

VŠB - Technická univerzita Ostrava
Fakulta elektrotechniky a informatiky

DIPLOMOVÁ PRÁCE

2015

Bc. Rostislav Šimek

VŠB - Technická univerzita Ostrava
Fakulta elektrotechniky a informatiky
Katedra elektroenergetiky

Návrh a nastavení elektrických ochran
pro rozvodnu Šternberk 22 kV

Proposal and Setting of Electric Protections
of Distributing Substation Šternberk 22 kV

2015

Bc. Rostislav Šimek

VŠB - Technická univerzita Ostrava
Fakulta elektrotechniky a informatiky
Katedra elektroenergetiky

Zadání diplomové práce

Student: **Bc. Rostislav Šimek**
Studijní program: N2649 Elektrotechnika
Studijní obor: 3907T001 Elektroenergetika
Téma: **Návrh a nastavení elektrických ochran pro rozvodnu Šternberk 22 kV**
Proposal and Setting of Electric Protections of Distributing Substation Šternberk 22 kV

Zásady pro vypracování:

1. Teoretický rozbor ochrany a jištění
2. Teoretický rozbor výpočtu zkratových proudů
3. Popis ochrany navržených pro chránění rozvodny
4. Návrh nastavení elektrických ochran pro rozvodnu
5. Zhodnocení navrženého řešení elektrických ochran

Seznam doporučené odborné literatury:

1. Janíček, F., Chladný, V. a kol.: Digitální ochrany v elektrizační soustavě. STU Bratislava, 2004.
2. Hradílek, Z.: Elektroenergetika distribučních a průmyslových sítí. Montanex a.s., Ostrava, 2008.
3. Dohnálek, P.: Ochrany pro průmysl a energetiku. SNTL, Praha 1991.
4. Haluzík, E.: Ochrany a automatiky v elektrických sítích. Skriptum VUT Brno, 1985.
5. ČSN EN 60909-0. Zkratové proudy v trojfázových střídavých soustavách. Květen 2002.
6. ČSN 33 3051. Ochrany elektrických strojů a rozvodných zařízení. Listopad 1992.
7. Firemní literatura a katalogy, technická dokumentace rozvodny 22 kV.

Formální náležitosti a rozsah diplomové práce stanoví pokyny pro vypracování zveřejněné na webových stránkách fakulty.

Vedoucí diplomové práce: **doc. Dr. Ing. Zdeněk Medvec**

Datum zadání: 01.09.2014

Datum odevzdání: 07.05.2015

prof. Ing. Stanislav Rusek, CSc.
vedoucí katedry



prof. RNDr. Václav Snášel, CSc.
děkan fakulty

Prohlášení

„Prohlašuji, že jsem svou diplomovou práci vypracoval samostatně. Uvedl jsem všechny literární prameny a publikace, ze kterých jsem čerpal.“

V Ostravě dne 1. 5. 2015


.....

Bc. Rostislav Šimek

Poděkování

Na tomto místě bych rád poděkoval firmě ČEZ Distribuce, a.s. za poskytnuté podklady pro zpracování diplomové práce. Za odbornou pomoc, teoretické a praktické rady při vytváření této práce bych chtěl poděkovat konzultantovi diplomové práce Ing. Milanu Blokšovi. Děkuji také vedoucímu diplomové práce doc. Dr. Ing. Zdeňku Medvecovi.

ABSTRAKT

Cílem předkládané diplomové práce je navrhnout a nastavit elektrické ochrany pro rozvodnu Šternberk 22 kV. Úvodní část této práce stručně charakterizuje řešený problém. V teoretické části je pozornost věnována především teoretickému rozboru ochran a rozboru výpočtu zkratových poměrů v elektrizační soustavě. V následujících kapitolách je uveden stručný popis transformátorů, rozvodny 110 kV a 22 kV, a současného stavu chránění rozvodny Šternberk. Ochrany navržené pro rozvodnu Šternberk jsou popsány v čtvrté části. Hlavní část diplomové práce se zabývá výpočtem zkratových poměrů na jednotlivých vývodech z rozvodny Šternberk. V další kapitole je uveden návrh nastavení jednotlivých ochran. Zhodnocení navrženého řešení elektrických ochran tvoří poslední část této práce.

KLÍČOVÁ SLOVA

Rozvodna, ochrana, zkrat, zemní spojení, zkratový proud, nadproudová ochrana, zemní ochrana, automatika opětovného zapnutí, nadproudový stupeň, zkratový stupeň, vypínací čas, selektivita.

ABSTRACT

The aim of this thesis is to proposal and settings of electrical protection of distributing substation 22 kV Šternberk. The introductory part of this work briefly describes solve of the problem. In the theoretical part, the focus is primarily protections on theoretical analysis and analysis calculation of short circuit conditions in the electricity system. The following sections provide a brief description of transformers, substation 110 kV and 22 kV, and current state of substation protection Šternberk. Protections proposal for substation Šternberk are described in the fourth part. The main part of thesis deals with the calculation of short circuit conditions at each of the leads from the substation Šternberk. The next section is given a draft setting of individual protections. Evaluation of the proposed solution electrical protection is the last part of this work.

KEY WORDS

Substation, protection, short circuit, ground fault, short circuit current, overcurrent protection, fault protection, automatic reclosing, overcurrent stage, short circuit stage, tripping time, selectivity.

SEZNAM POUŽITÝCH ZNAKŮ A SYMBOLŮ

A/D	analogově digitální	
ASR 4.0	zhášecí tlumivka	
A96	řídící systém	
DC	stejnosměrný proud	
ER323	záblesková ochrana	
FV1	svodič přepětí	
F181	záblesková ochrana	
F111	nadproudová ochrana	
F121	zkratová ochrana	
F151	citlivá zemní směrová ochrana	
F281	automatika OZ	
HDO	hromadné dálkové ovládání	
MCS	vícekanálový komunikační systém	
OZ	opětovné zapnutí	
PC	osobní počítač	
PTP	přístrojový transformátor proudu	
QM	vypínač	
RIO 644	vnitřní skříňová rozvodna	
TA1	přístrojový transformátor proudu	
TVS	transformátor vlastní spotřeby	
TV1	přístrojový transformátor napětí	
VN	vysoké napětí	
VVN	velmi vysoké napětí	
7SJ636	multifunkční ochrana	
7SJ645	multifunkční ochrana	
7SJ804	multifunkční ochrana	
7UT613	rozdílová ochrana	
max	maximální	
min	minimální	
I''_k	počáteční rázový zkratový proud	(kA)
I''_{k3}	trojfázový počáteční rázový zkratový proud	(kA)

I''_{k2}	dvoufázový počáteční rázový zkratový proud	(kA)
I''_{k1}	jednofázový počáteční rázový zkratový proud	(kA)
$I''_{k3\max}$	maximální zkratový proud	(kA)
$I''_{k2\min}$	minimální zkratový proud	(kA)
I	poruchový proud	(A)
I_n	dovolené zatížení	(A)
I_r	rozběhový proud	(A)
I_0	nulová složka proudu	(A)
I_c	kapacitní proud	(A)
I_L	induktivní proud	(A)
I_R	proud tekoucí přes odpor	(A)
I_{L1}, I_{L2}, I_{L3}	fázový proud	(A)
I_∞	nastavený rozběhový proud	(A)
I_o	vypínací proud	(A)
I_k	nastavený vypínací proud	(A)
$I_>$	vypínací proud nadproudového stupně	(A)
$I_{>>}$	vypínací proud zkratového stupně	(A)
I_S	vypínací proud ochrany proti nesymetrii	(A)
K	impedanční korekční součinitel	(-)
L	indukčnost	(mH)
P_k	jmenovité ztráty nakrátko transformátoru	(kVA)
P_o	jmenovité ztráty naprázdno transformátoru	(kVA)
R_{T101}	odpor transformátoru	(Ω)
R_v	výsledný činný odpor vedení	(Ω)
R_0	činný odpor	(Ω)
S	jmenovitý průřez vedení	(mm ²)
S''_k	počáteční rázový zkratový výkon	(MVA)
$S''_{k\max}$	maximální zkratový výkon	(MVA)
$S''_{k\min}$	minimální zkratový výkon	(MVA)

U_n	jmenovité napětí sítě	(kV)
U_{n1T}	primární jmenovité napětí transformátoru	(kV)
U_{n2T}	sekundární jmenovité napětí transformátoru	(kV)
U_0	nulová složka napětí	(V)
X_{\max}	maximální celková zkratová reaktance	(Ω)
X_{\min}	minimální celková zkratová reaktance	(Ω)
$X''_{k \max}$	maximální zkratová reaktance	(Ω)
$X''_{k \min}$	minimální zkratová reaktance	(Ω)
X_{T101}	reaktance transformátoru	(Ω)
X_v	výsledná reaktance vedení	(Ω)
Z_{\max}	maximální celková impedance	(Ω)
Z_{\min}	minimální celková impedance	(Ω)
Z_{T101}	impedance transformátoru	(Ω)
\underline{a}	komplexní konstanta	(-)
c	napěťový součinitel	(-)
k_e	součinitel pro určení ekvivalentního oteplovacího proudu	(-)
l	délka vedení	(km)
p_p	převodový poměr	(-)
t_k	teoretický čas vypnutí	(s)
Δt	stupeň časové selektivity	(s)
$t_{>}$	vypínací čas nadproudového stupně	(s)
$t_{>>}$	vypínací čas zkratového stupně	(s)
t_0	vypínací čas zemní směrové ochrany	(s)
t_s	vypínací čas ochrany proti nesymetrii	(s)
t_{oz}	vypínací čas automatiky opětovného zapnutí	(s)
t_{vyp}	maximální dovolený vypínací čas	(s)
u_k	napětí nakrátko	(%)
κ	součinitel nárazového zkratového proudu	(-)
φ	fázové posunutí	($^\circ$)

OBSAH

1. ÚVOD	1
2. TEORETICKÝ ROZBOR OCHRAN A JIŠTĚNÍ	2
2.1 Definice ochrany	2
2.2 Chráněný objekt	3
2.3 Poruchové stavy	4
2.4 Rozdělení ochran.....	5
2.5 Požadavky na ochrany.....	7
2.6 Základní členy ochran	9
2.6.1 Vstupní člen	9
2.6.2 Popudový člen.....	10
2.6.3 Logika	10
2.6.4 Měřicí člen	10
2.6.5 Časový člen	13
2.6.6 Koncový člen	13
2.6.7 Napájecí člen.....	14
2.6.8 Filtry souměrných složek	14
2.7 Nadproudové ochrany	15
2.7.1 Závislé nadproudové ochrany	16
2.7.2 Nezávislé nadproudové ochrany	17
2.7.3 Směrové nadproudové ochrany.....	19
2.8 Zemní ochrana.....	19
2.9 Automatika opětovného zapnutí.....	20
3. TEORETICKÝ ROZBOR VÝPOČTU ZKRATOVÝCH PROUDŮ	21
3.1 Druhy zkratů.....	21
3.2 Způsoby spojení částí s různým potencionálem.....	22
3.3 Definice základních pojmů.....	22
3.4 Předpoklady výpočtu zkratových proudů.....	23
3.5 Metoda výpočtu.....	24
3.5.1 Ekvivalentní napěťový zdroj v místě zkratu	24
3.5.2 Použití souměrných složek.....	24
3.6 Maximální zkratové proudy	26
3.7 Minimální zkratové proudy	27
3.8 Výpočet parametrů prvků soustavy	27
3.8.1 Soustava (nadřazená síť)	27

3.8.2 Dvouvinutový transformátor	28
3.8.3 Reaktor omezující zkratový proud	28
3.8.4 Vedení	28
3.9 Výpočet parametrů prvků soustavy	29
3.9.1 Počáteční souměrný rázový zkratový proud I_k''	29
3.9.2 Nárazový zkratový proud I_p	30
3.9.3 Ekvivalentní oteplovací proud I_{th}	30
4. POPIS SOUČASNÉHO STAVU CHRÁNĚNÍ ROZVODNY	31
4.1 Rozvodna 110kV	32
4.2 Transformace 110/22 kV	32
4.3 Rozvodna 22kV	33
4.5 Stávající ochrany rozvodny	34
5. POPIS NAVRŽENÝCH OCHRAN PRO ROZVODNU	35
5.1 Popis ochran	35
5.2 Vlastností ochran	35
5.3 Ochranné funkce	36
5.4 Použití ochran	37
6. VÝPOČET ZKRATOVÝCH POMĚRŮ	38
7. NASTAVENÍ NAVRŽENÝCH OCHRAN	50
8. ZHODNOCENÍ NAVRŽENÉHO ŘEŠENÍ	52
Použitá literatura	54
Seznam obrázků	55
Seznam tabulek	56

1. Úvod

Při provozu elektrizační soustavy se mohou vyskytnout stavy, které narušují spolehlivost a bezpečnost bezporuchového provozu. V případě vzniku poruchového stavu, může dojít k ohrožení elektrických zařízení ale i bezpečnosti osob, které dané zařízení obsluhují. Takové stavy jsou v provozu silnoprůdového elektrického rozvodu nežádoucí a snažíme se je eliminovat použitím ochran a automatik opětovného zapnutí.

Elektrická ochrana je zařízení, které kontroluje chod určité části energetického systému. Informace o stavových veličinách chráněného objektu získává pomocí přístrojových transformátorů proudu a napětí, či elektronických převodníků. Ochrana následně vyhodnotí, zda se jedná o poruchu nebo normální provozní stav. V případě poruchy uvnitř chráněného objektu vydá povel k jejímu odstranění. Od elektrických ochran požadujeme spolehlivé a selektivní působení tak, aby byly následky poruch eliminovány na co nejmenší míru.

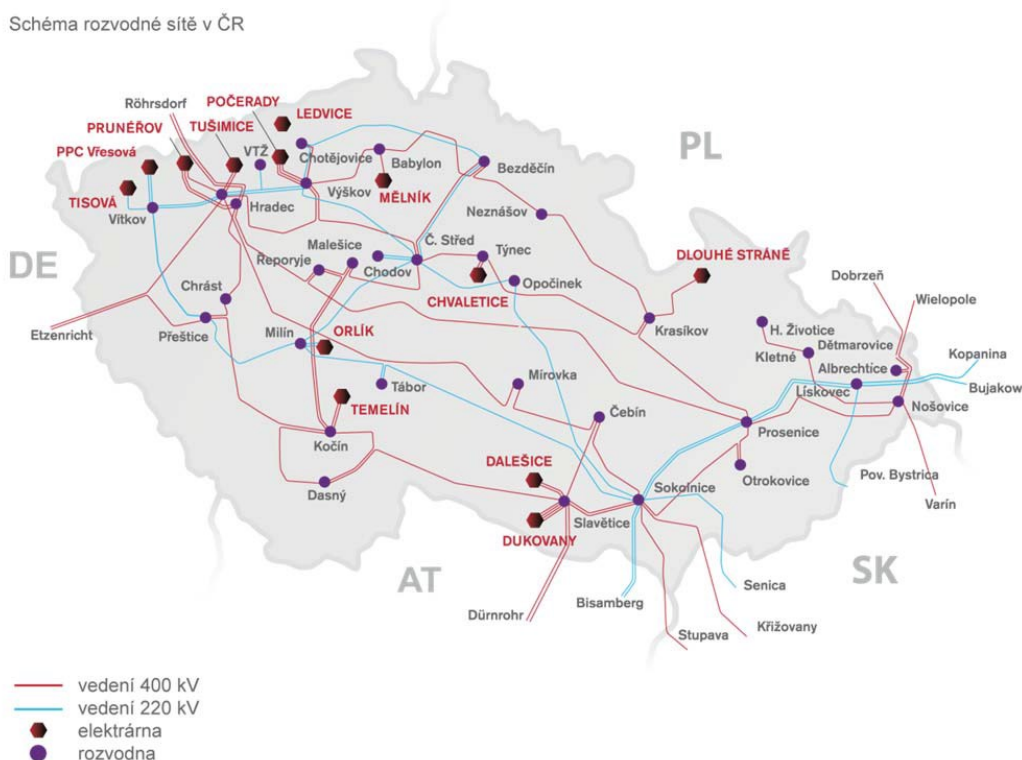
Dříve se používaly především ochrany elektromechanické a tranzistorové. V současné době se do popředí dostávají digitální ochrany, které mají řadu výhod oproti ochranám analogovým. Hlavní výhoda spočívá ve zvýšené spolehlivosti. Získávají více informací pro dispečink a technické pracoviště, dále umožňují sloučení více ochranných funkcí do jedné multifunkční ochrany.

Síť velmi vysokého napětí je chráněna distančními ochranami. Transformátory jsou chráněny hlavními a záložními ochranami. Mezi hlavní ochrany transformátorů patří ochrana rozdílová, plynové relé a ochrana nádobová. Jako záložní ochrany můžeme použít nadproudovou či distanční ochranu. Nadproudové ochrany chrání vedení vysokého napětí.

V teoretické části diplomové práce se zabývám teoretickým rozбором ochran a jištěním. Další kapitola se věnuje teoretickému rozboru výpočtu zkratových proudů. V praktické části je stručně popsán současný stav chránění rozvodny a nově navržené ochrany pro rozvodnu Šternberk 22 kV. Dále je proveden výpočet zkratových proudů, podle kterých budou nastaveny ochrany na jednotlivých vývodových polích.

2. Teoretický rozbor ochran a jištění

Elektrizační soustava je vzájemně propojený soubor zařízení pro výrobu, transformaci, přenos, rozvod a spotřebu elektrické energie. Z pohledu spolehlivosti, bezporuchového provozu a bezpečnosti je systém chránění nedílnou součástí elektrizační soustavy. Tyto základní požadavky při provozu silnoproudého elektrického rozvodu zajišťují elektrické ochrany, které jsou jednou ze součástí systému chránění. [1]

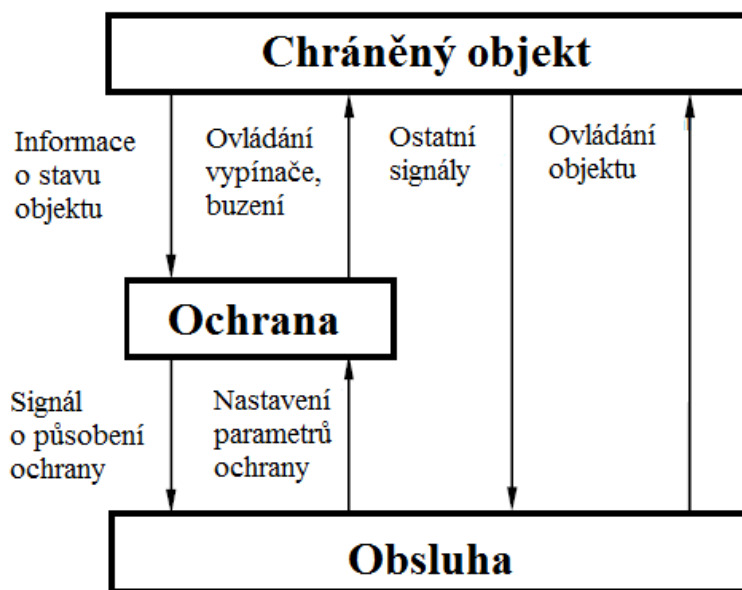


Obr. 2.1 Schéma přenosové soustavy České republiky [12]

2.1 Definice ochrany

Ochrana je zařízení, které je navrženo ke kontrole chodu určité části energetického systému. Energetický systém je definován jako množina chráněných objektů, které jsou vzájemně propojeny. Hlavním úkolem ochrany je na základě vstupních informací a nastavených parametrů rozhodnout, zda jde o poruchový nebo dovolený provozní stav. Vstupní informace o jednotlivých

veličinách chráněného objektu získává ochrana pomocí přístrojových transformátorů proudu a napětí, čidel nebo elektronických převodníků. Porovnává mezi sebou skutečnou hodnotu s nastavenou. Ochrana vyhodnotí, je-li chráněný objekt v mezích normálního provozu, nebo zda jde o poruchový stav. V případě poruchy uvnitř chráněného objektu, musí dát ochrana povel na vypnutí, resp. musí signalizovat abnormální provozní stav obsluze. Blokové schéma vzájemné spolupráce mezi ochranou a chráněným objektem je znázorněno na obr. 1.2. Od ochrany se požaduje, aby působily přesně ve vymezených zónách tak, aby části energetického systému, které jsou bez poruchy, zůstali vždy v provozu. [4]



Obr. 2.2 Spolupráce ochrany a chráněného objektu [4]

2.2 Chráněný objekt

Je určitý prvek energetické soustavy. Toto fyzikální zařízení přenáší energii v rámci svého okolí. Chráněnými objekty mohou být generátory, motory, transformátory, vedení atd. Okamžitou funkci chráněného objektu určujeme pomocí stavových veličin (napětí, proud, okamžitý výkon a kmitočet), jejíž velikost charakterizuje současné chování objektu. Ovládání objektu je soubor zařízení, přes které působí ochrana na objekt (jsou to vypínače, odbuzovače apod.). [2]

2.3 Poruchové stavy

V elektrizační soustavě se mohou vyskytnout stavy, které narušují bezpečnost provozu. Může dojít k elektrickému, tepelnému i mechanickému poškození izolace vodičů a elektrických zařízení. Takové stavy jsou nežádoucí a nazýváme je poruchami. V elektrizační soustavě mohou nastat následující poruchy: [2], [4]

Zkrat je elektromagnetický přechodový děj v elektrizační soustavě. Vzniká při náhodném nebo úmyslném vodivém spojení mezi dvěma nebo více vodivými částmi. Dochází k tomu, že rozdíl elektrických potencióálů mezi těmito částmi je roven nule nebo má hodnotu blízkou nule. Místem vzniku zkratu prochází několikanásobně větší proud vzhledem k jmenovitým hodnotám. To je způsobeno výrazným snížením impedance zkratového obvodu. Tento druh poruchy způsobuje elektrické poškození dielektrik a izolátorů, tepelné poškození vodičů a mechanické poškození vlivem působení dynamických sil. Míra poškození závisí na velikosti poruchového proudu a době trvání zkratu. Zkrat je často způsoben únavou izolace, mechanickým poškozením, špatnou manipulací, vlivem počasí apod.

Přetížení lze definovat jako průchod příliš velké energie zařízením. Způsobuje především tepelné poškození izolace a snížení mechanické pevnosti vodičů, urychluje stárnutí izolací. Přetížení bývá obvykle způsobeno nedostatkem instalovaného činného elektrického výkonu. Míra poškození závisí na velikosti poruchového proudu a době trvání přetížení.

Přepětí mohou být atmosférická (vznikají úderem blesku do vedení či do některých částí elektrických zařízení) nebo provozní (způsobena spínacími pochody v obvodech s velkými indukčnostmi nebo kapacitami). Přepětí způsobuje poškození a stárnutí izolace, zvyšuje pravděpodobnost vzniku zkratu.

Podpětí má za následek především proudové přetížení při konstantním výkonu zátěže. Nejčastěji bývá způsobeno nedostatečnou kompenzací, přetížením nebo poruchou regulace napětí.

Snížení frekvence signalizuje zpravidla nedostatek činného výkonu v elektrizační soustavě. Při nedostatku výkonu je nutné snížit spotřebu. V důsledku snížení kmitočtu dochází ke zvětšení magnetizačních proudů, což vyvolá nárůst ztrát a oteplení. Snížení kmitočtu nastává přetížením zdrojů energie v síti.

Zvýšení frekvence bývá způsobeno poruchou regulace výkonu. Zvýšení kmitočtu působí především mechanicky na chráněné zařízení i připojené stroje.

Nesouměrnost proudu je nebezpečná zejména pro synchronní a asynchronní točivé stroje. Následkem nesouměrnosti proudu vzniká zpětná složka proudu, která způsobuje přídavné vířivé ztráty, dochází k zahřívání rotoru. Nesouměrnost proudu může být zapříčiněna přerušením vodičů nebo nesouměrností zátěže.

Nesouměrnost napětí snižuje kvalitu dodávané elektrické energie. Má za následek nesouměrnost proudu.

Zemní spojení je galvanické spojení jedné fáze se zemí v síti s kompenzovaným nebo izolovaným uzlem. Důsledkem zemního spojení se zvýší napětí v nepostížených fázích, čímž se zvyšuje pravděpodobnost následných zkratů.

Zpětný tok výkonu je porucha zvláště nebezpečná pro točivé stroje. Jde o přenos energie z generátoru do turbíny nebo z motoru do sítě, kdy může dojít k poškození připojeného mechanického stroje. Zpětný tok výkonu je způsoben chybnou regulací výkonu nebo špatnou energetickou bilancí sítě.

Ztráta buzení synchronních točivých strojů je dána zmenšením budícího proudu pod mez statické stability. Má za následek snížení napětí (ohrožení stability sítě) a také hrozí asynchronní chod stroje.

Ložiskové proudy vyvolají přídavné oteplení a tím dochází i k mechanickému poškození ložisek točivých strojů.

Kývání synchronního stroje se projevuje v elektrizační soustavě jako fiktivní zkrat, který jako by se periodicky pohyboval po spojovacím vedení mezi synchronními stroji. Působení ochran během kývání synchronních strojů je nežádoucí, pokud nedojde ke ztrátě dynamické stability.

2.4 Rozdělení ochran

Ochrany můžeme roztrždit podle následujících kritérií: [1], [4]

a) Podle typu chráněného objektu

- vedení (venkovní, kabelové)
- přípojníc
- transformátoru
- generátoru
- motoru
- speciální

a) Podle druhu poruchy

- zkratové
- při přetížení
- nadpět'ové
- podpět'ové
- podkmitočtové
- nadkmitočtové
- při zemním spojení
- při zpětném toku výkonu
- při ztrátě buzení
- při nesouměrnosti

b) Podle funkčního principu

- proudové
- napět'ové
- distanční
- rozdílové
- srovnávací
- wattové
- jalové
- kmitočtové
- při nesouměrnosti

c) Podle doby působení

- **mžikové** - ochrana působí ihned po vzniku poruchy, její rychlost je omezena pouze dobou zpracování informace uvnitř ochrany

- **časově závislé** - doba působení ochrany je definována jako funkce některé stavové veličiny

- **časově nezávislé** – doba působení ochrany je konstantní

d) Podle konstrukce

- **elektromechanické** - ochrany jsou sestaveny převážně z klasických elektrických relé

- **elektronické (statické)** - ochrany jsou sestaveny z polovodičových součástek a integrovaných obvodů, informace o velikosti zpracovávané hodnoty je zobrazena spojitě

-**digitální (číslicové)** - ochrany jsou realizovány mikroprocesory či řídicími počítači, zpracovávají spojitě vstupní veličiny ve formě diskretních číselných hodnot

2.5 Požadavky na ochrany

Jakost ochrany a vhodnost jejího použití pro daný objekt hodnotíme podle toho, jak splňuje jednotlivé požadavky, které jsou na ni kladeny. Důležitost požadavku záleží na druhu chráněného objektu, na způsobu provozu i na okolní soustavě. Požadavky kladené na systém chránění jsou následující: [1], [2], [3], [4]

Rychlost omezuje nebezpečné následky poruch. Rychlost působení je definována od vzniku poruchy do vypnutí vypínače. Doba působení se skládá jednak z vlastní doby vybavení ochrany, jednak z doby, za kterou provede vypínač vypnutí. Nutnost rychlého působení závisí na následcích poruchy. Rychlé vypnutí poruchy zvětšuje stabilitu soustavy a omezuje chod spotřebičů při sníženém napětí.

$$t_z = t_p + t_0 \quad (2.1)$$

kde t_z doba trvání poruchy,
 t_p doba působení ochrany,
 t_0 doba ovládacího zařízení (vypínače).

Citlivost je dána velikostí stavové veličiny, na kterou je ochrana nastavena a podle níž určuje poruchu. V provozu je hodnota stavové veličiny, při které ochrana reaguje nižší než hodnota poruchové veličiny z důvodu bezpečnosti.

$$K = \frac{I_{ks}}{I_0} \quad (2.2)$$

kde K citlivost ochrany,
 I_{ks} hodnota proudu při poruše,
 I_0 hodnota proudu, při kterém ochrana spíná.

Přesnost je poměrná chyba citlivosti ochrany vyjádřená v procentech. Přesnost je definována následujícím vztahem:

$$\delta = \left| \frac{x - x_b}{x_a} \right| \cdot 100 \quad (2.3)$$

kde δ přesnost ochrany (%),
 x nastavení citlivosti ochrany,
 x_a rozsah třiditelnosti ochrany,
 x_b skutečná citlivost ochrany.

Miniaturizace šetří stavební prostory ochrany. Využitím tranzistorů a především číslicové techniky lze dosáhnout výrazného zmenšení rozměrů ochrany.

Komptabilitou ochran s ostatní řídicí technikou objektu se rozumí použití obdobné konstrukce, technologie i principů. Komptabilita má tyto výhody: jednodušší vzájemný přenos signálu, jednotnou projekci a uvádění těchto zařízení do provozu, údržba vyžaduje obdobné náhradní díly.

Spolehlivost ochrany znamená, že ochrana nesmí při poruše selhat. Naopak při bezporuchovém chodu nesmí samovolně působit.

Jednoduchost: Čím menší počet dílů ochrana obsahuje, tím menší je pravděpodobnost vzniku poruchy než u ochrany složité.

Odolnost je důležitá proto, že v provozu je ochrana vystavena mnoha škodlivým vlivům, které ji mohou poškodit. Jedná se především o prašné prostředí, agresivní plyny v ovzduší, otřesy, magnetická a elektrická pole při zkratech apod.

Snadná údržba: Spolehlivost ochran lze zvýšit prováděním periodických revizí, při nichž jsou ochrany zkoušeny. Proto je nutná snadná údržba. Poškozená ochrana se při revizi vymění nebo opraví.

Životnost ochrany souvisí se spolehlivostí. Během života ochrany se její spolehlivost opotřeбенím zmenšuje.

Selektivita je schopnost ochrany nereagovat na poruchy soustavy, které jsou mimo chráněný objekt, nebo se týkají stavové veličiny objektu, na kterou nemá ochrana působit. Smysl selektivity je v tom, že je vypínán co nejmenší úsek energetické soustavy, který je postižen poruchou. Přitom co největší část nepoškozené soustavy zůstane v provozu. Dochází ke zmenšení nebezpečí ztráty stability a zhroutení soustavy. Selektivitu můžeme zajistit těmito způsoby: časovým odstupňováním vypínacích časů, odstupňováním úrovně nastavené veličiny (proud, napětí, impedance), zpracováním více veličin současně (impedanční ochrany), zpracováním informací z více míst (rozdílové a srovnávací ochrany) a kombinací více způsobů výše uvedených.

Objektivita: Z hlediska objektivity rozeznáváme ochrany autonomní a objektivní. Autonomní ochrana působí optimálně pouze z úzkého hlediska chráněného objektu, které je dané omezeným množstvím vstupních informací a zpravidla jednoduchým algoritmem jejich zpracování. Objektivní ochrana řeší poruchovou situaci z hlediska celé, anebo alespoň části soustavy.

2.6 Základní členy ochran

Elektrická ochrana se skládá z několika částí. Jejich počet a druh závisí na typu ochrany. Na konstrukci ochrany má vliv složitost jejího algoritmu a požadované funkce, které má ochrana plnit. Mezi základní části ochran patří: vstupní člen, popudový člen, měřicí člen, logika ochrany, časový člen, koncový člen, napájecí člen, filtry souměrných složek proudu a napětí. Ochrana nemusí obsahovat všechny výše uvedené členy. [1], [4]

2.6.1 Vstupní člen

Vstupní člen elektrické ochrany převádí pomocí bočníků, děličů a transformátorů vstupní veličiny (proud a napětí) na požadovaný tvar a úroveň pro další zpracování. Jmenovitý vstupní proud ochrany může být buď 5 A nebo 1 A, jmenovité vstupní napětí ochrany je obvykle 100 V. Kontrolované veličiny jsou přivedeny na vstupní svorky ochran z přístrojových transformátorů proudu a napětí, které galvanicky oddělují vnitřní obvody ochrany od okolí a chrání

je před elektromagnetickým rušením. Měřicí členy uvnitř ochrany pracují s proudem a napětím v řádech miliampérů a voltů. U číslicových ochran vstupní člen tvoří A/D převodníky, které vzorkují a převádí vstupní veličinu z analogového tvaru na číselný.

2.6.2 Popudový člen

Popudový člen zajišťuje pouze rozběh ochrany. V případě vzniku poruchy v energetické soustavě dává popud informaci měřicímu členu a logice ochrany, které rozhodují, zda příslušná porucha patří do kompetence ochrany. Rozběhový i měřicí člen mohou mít totožné vlastnosti a jejich charakteristiky mohou být obdobné. Popudový člen však musí mít výrazně vyšší citlivost než měřicí člen, aby byla zajištěna podmínka spolehlivé činnosti ochrany jako celku. Může sledovat i více veličin chráněného objektu a může mít různé charakteristiky chránění.

2.6.3 Logika

Logika ochrany zpracovává logický signál z popudu a určuje funkci měřicího členu. Na základě signálu z měřicího členu určuje funkci koncového členu. Všechny vstupy a výstupy logiky jsou tvořeny základními logickými funkcemi Boolovi algebry. Její strukturu lze realizovat jako soustavu tří logických funkcí (součtu, součinu a negace). Logika může být tvořena klasickými a jazyčkovými relé, diodami, tranzistory, integrovanými obvody nebo technickým (hardware) a programovým (software) vybavením u číslicového procesoru.

2.6.4 Měřicí člen

Měřicí člen rozhoduje o poruše v objektu. Na jeho vstup je přiveden stav objektu. Měřicí člen určuje hranici charakteristiky ochrany mezi dovoleným a zakázaným (poruchovým) stavem. Většina vlastností elektrických ochran (selektivita, citlivost a přesnost) je závislá na měřicím členu a jeho algoritmu. Oblast, ve které ochrana působí je určena použitým měřicím členem (principem měření). Měřicí členy analyzujeme podle charakteru funkce nikoliv podle zpracovávané veličiny. Rozlišujeme následující měřicí členy ochran:

- **Amplitudový měřicí člen**

Amplitudový měřicí člen měří velikost vstupního proudu nebo napětí. V případě překročení nastavené hodnoty citlivosti zapůsobí. Amplitudové měřicí členy se používají pro měření proudu, napětí, výkonu pro různé ochrany. Rozlišujeme tyto typy amplitudových měřicích členů:

Střídavý amplitudový měřicí člen na střední hodnotu:

$$K = \frac{1}{T} \int_0^T |x(t)| dt \quad (2.4)$$

kde K citlivost (nastavitelná) měřicího členu
 T doba periody měřené veličiny $x(t)$
 $x(t)$ měřená veličina (napětí nebo proud)

Střídavý amplitudový měřicí člen na efektivní hodnotu:

$$K^2 = \frac{1}{T} \int_0^T x^2(t) dt \quad (2.5)$$

Stejnoseměrný amplitudový měřicí člen:

$$K = \frac{1}{T} \int_0^T x(t) dt \quad (2.6)$$

Amplitudový měřicí člen na maximální hodnotu:

$$K = \max[x(t)] \quad (2.7)$$

- **Závislý měřicí člen**

Zjišťuje velikost proudu nebo napětí v závislosti na době trvání poruchy. Tento měřicí člen se používá všude tam, kde stavová veličina nepoškozuje objekt přímo svojí velikostí, ale akumulací energie během trvání poruchy. Jsou zabudovány v závislých proudových a napěťových ochranách proti přetížení.

$$t = \frac{K}{(x - x_{\infty})} \quad \text{pro } x > x_{\infty} \quad (2.8)$$

- **Rozdílový měřicí člen**

Porovnává velikost dvou vstupních veličin. Působí má-li veličina $x_a(t)$ větší hodnotu než veličina $x_b(t)$ o nastavenou hodnotu citlivosti. Používá se v rozdílových ochranách.

Rozdílový měřicí člen na střední hodnotu:

$$K = \frac{1}{T} \int_0^T [|x_a(t)| - |x_b(t)|] dt \quad (2.9)$$

Rozdílový měřicí člen na efektivní hodnotu:

$$K^2 = \frac{1}{T} \int_0^T [|x_a(t)| - |x_b(t)|]^2 dt \quad (2.10)$$

- **Amplitudový komparátor**

Amplitudový komparátor je speciálním případem rozdílového měřicího členu s velkou citlivostí ($K \rightarrow 0$). Používá se jako součást distančního měřicího členu nebo rozběhového členu.

$$\int_0^T [|x_a(t)| - |x_b(t)|] dt \geq 0 \quad (2.11)$$

- **Fázový komparátor**

Fázový komparátor je součinný měřicí člen se značnou citlivostí, kde citlivost měřicího členu ($K \rightarrow 0$). Výstup závisí pouze na fázovém úhlu amplitud obou stavových veličin. Používá se ve srovnávacích ochranách.

$$x_a \cdot x_b \cdot \cos \varphi \geq 0 \quad (2.12)$$

- **Součinový měřicí člen**

Součinový měřicí člen se používá ve wattových a jalových ochranách. Jsou-li vstupními veličinami napětí a proud, měří člen činný výkon nebo výkon jalový. Tyto členy bývají realizovány elektrodynamickým nebo indukčním relé, analogovým násobením s integrátorem, nebo číslicovým násobením.

$$K = \frac{1}{T} \int_0^T x_a(t) \cdot x_b(t) dt \quad (2.13)$$

2.6.5 Časový člen

Časový člen prodlužuje dobu působení ochrany. Na jeho vstup přichází signál z logiky. Časový člen se používá z těchto důvodů:

K zajištění selektivity

Zpožděním ochrana umožňuje funkci jiné ochrany, která je blíže k poruše. Podobně záložní ochrana může mít nastaveno větší zpoždění než ochrana základní.

Využití možné akumulace energie v objektu

Zpožděním může ochrana např. dovolit přetížení, pokud toto přetížení neohrozí chráněný objekt. Konstantní zpoždění můžeme použít jako náhradu závislého měřicího členu, ovšem není tak dokonalá.

Vyloučení chybného působení

Je způsobeno přechodnou poruchou krátkého trvání.

2.6.6 Koncový člen

Koncové členy ochran jsou nejčastěji realizovány pomocnými relé s výkonovými kontakty. Vstupní signál do koncového členu přichází z logiky. Smyslem koncového členu je upravit signál z logiky tak, aby byl schopen předání ovládacím zařízením objektu. Musí mít dostatečně vysokou úroveň a snést vnější rušení. Kontakty výstupních obvodů koncového členu musí mít dostatečnou zatížitelnost. Signál z koncového členu působí vypínací cívku vypínače, ale provádí jen signalizaci.

2.6.7 Napájecí člen

Zajišťuje napájení ochrany buď z akumulátorových baterií, nebo ze střídavé sítě, které je méně spolehlivé. Výhodnější je tedy napájet ochranu z akumulátorových baterií přímo přes stabilizátor nebo s galvanickým oddělením. Galvanické oddělení se provádí soustavou: střídač – transformátor – usměrňovač – stabilizátor a filtr. Pohon ochran se provádí jako:

Ochrany bez napájení jsou to takové ochrany, které nepotřebují pomocné napětí.

Přímé napájení ze staniční baterie je nejpoužívanějším způsobem napájení elektromechanických ochran. Akumulátorová baterie je spolehlivá, ale vyžaduje dokonalou a náročnou údržbu.

Napájení ze střídavé sítě se používá jen ojediněle, jelikož může dojít častěji k výpadku.

Napájení přes stabilizátor se používá především u tranzistorových a číslicových ochran, protože vyžaduje lepší stabilizaci a filtraci napájecího napětí než elektromechanické členy.

Akumulátor umístěný v ochraně slouží pro napájení tranzistorových ochran. Dokonale odděluje napájecí obvody a chrání proti rušení. Akumulátor je průběžně dobíjen přes dokonalé filtry.

Napájení z přístrojových transformátorů nevyžaduje staniční baterii. V okamžiku poruchy obvykle klesá napětí chráněného objektu, zatím co jeho proud vzrůstá. Proto je vhodnější napájení ochran pomocí přístrojových transformátorů proudů. Napájení z přístrojových transformátorů napětí se kombinuje s napájením z přístrojových transformátorů proudů.

2.6.8 Filtry souměrných složek

Filtry souměrných složek proudů a napětí tvoří zvláštní skupinu členů, které se používají v rozběhových a měřicích členech ochran. Souměrné složky umožňují rozlišovat různé druhy nesymetrických poruch. Realizují se pasivními obvody nebo aktivními s použitím zesilovačů.

Členění filtrů souměrných složek:

- Filtry nulové složky proudu a napětí
- Filtry sousledné a zpětné složky proudu a napětí

2.7 Nadproudové ochrany

Nadproudové ochrany jsou používány pro svoji jednoduchost a projektují se u méně důležitých vedení a případně jako ochrany záložní. Nadproudové ochrany nemají tak vysokou selektivitu funkce jako ochrany distanční a rozdílové. Princip působení je od zvýšeného proudu při přetížení či zkratu. Z hlediska jejich působení v závislosti na nadproudu a čase rozeznáváme několik charakteristik: [4]

a) Závislou nadproudová ochrana působí v čase:

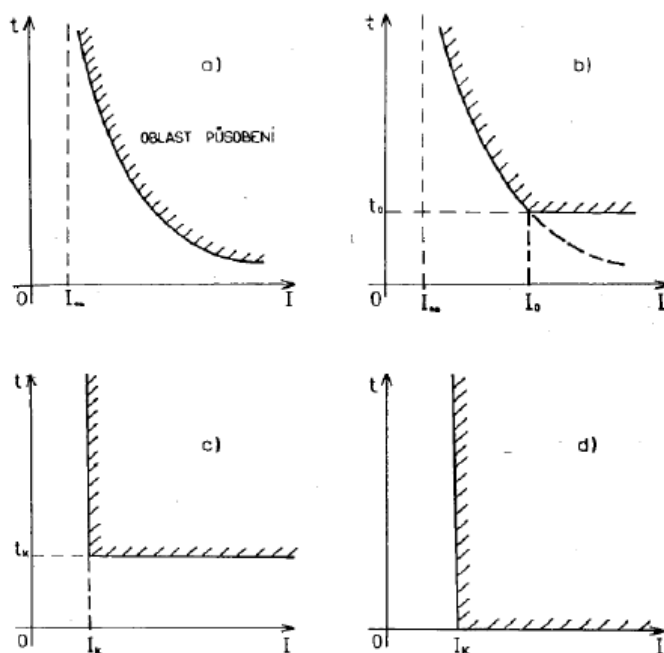
$$t = \frac{K}{(I - I_{\infty})^n} \quad \text{pro } I > I_{\infty} \quad (2.14)$$

$$t = \infty \quad \text{pro } I \leq I_{\infty} \quad (2.15)$$

b) Polozávislá nadproudová ochrana má charakteristiku působení definovanou stejně jako závislá ochrana pouze do velikosti proudu I_o . Pro větší proudy $I > I_o$ má konstantní dobu působení.

c) Nezávislá nadproudová ochrana působí v nastaveném čase t_k při dosažení nadproudu I_k .

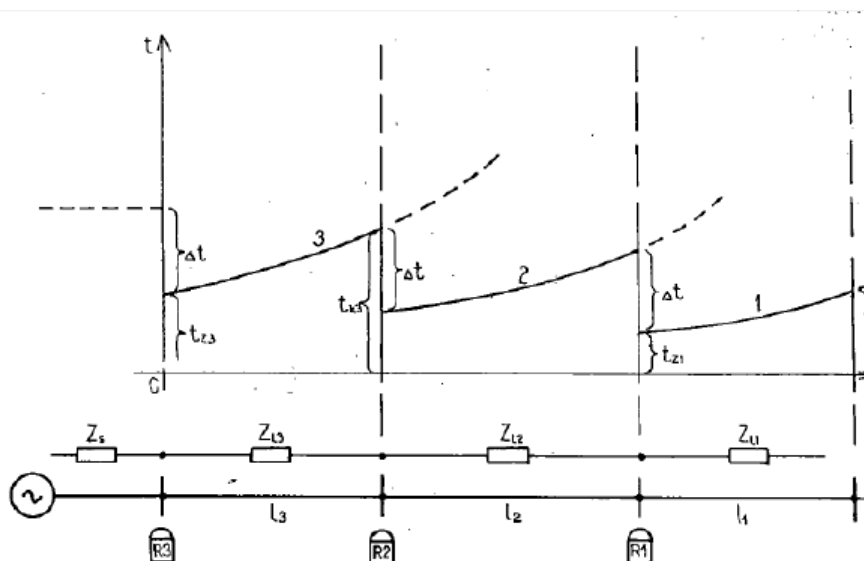
d) Mžikovou nadproudová ochrana působí při překročení nastaveného proudu I_k bez zpoždění.



Obr. 2.3 Vypínací charakteristiky nadproudových ochran [4]

2.7.1 Závislé nadproudové ochrany

Vypínací časy těchto nadproudových ochran jsou závislé na velikosti protékajícího proudu. Výhoda závislých nadproudových ochran spočívá v tom, že zkracují dobu vypnutí na začátku vedení. Těžší zkraty blíže zdroji jsou vypínány v kratším čase než zkraty na konci vedení. Jestliže je splněna podmínka, že impedance chráněného úseku je větší nebo rovna impedanci napájecí soustavy.

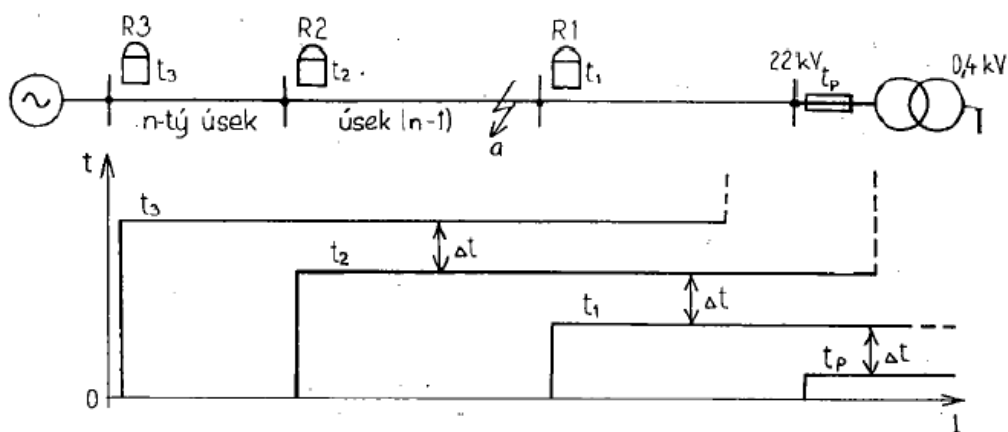


Obr. 2.4 Vypínací plán závislých nadproudových ochran [4]

Závislé nadproudové ochrany se používají nejčastěji v kabelových sítích vysokého napětí, jako záložní ochrany točivých strojů a transformátorů. Na úsecích jednoho paprsku nelze vzájemně kombinovat nadproudové závislé a nezávislé ochrany, jelikož by mohlo dojít k neselektivnímu vypínání.

2.7.2 Nezávislé nadproudové ochrany

Nezávislé nadproudové ochrany se používají v radiálních sítích vysokého napětí. Vhodným proudovým nastavením lze jednotlivé úseky vzájemně zálohovat. Nevýhodou nezávislých nadproudových ochran je, že těžší zkraty blíže zdroji jsou vypínány nejpozději.



Obr. 2.5 Vypínací plán nezávislých nadproudových ochran [4]

a) Stanovení stupně Δt časové selektivity

Při návrhu časového odstupňování ochran se stanoví stupeň časové selektivity rozdílem časového zpoždění ochran dvou sousedních úseků.

$$\Delta t = t_n - t_{(n-1)} \quad (2.16)$$

Stupeň časové selektivity musí být takový, aby porucha na předchozím úseku byla odpojena dříve, než způsobí ochrana následujícího úseku. Má být co nejmenší, aby se snížila úroveň časového zpoždění systému nadproudových ochran. V praxi bývá tento stupeň v rozmezí 0,25 až 0,5 sekund podle typu vypínačů a ochran. Při stanovení stupně časové selektivity uvažujeme:

$$\Delta t = t_{v(n-1)} + t_{r(n-1)} + t_{r_n} + t_z \quad (2.17)$$

kde $t_{v(n-1)}$ - doba vypnutí vypínače předcházejícího úseku,
 $t_{r(n-1)}$ - celková absolutní největší kladná chyba časového členu předcházející ochrany,
 t_{r_n} - celková absolutní největší záporná chyba časového členu následující ochrany,
 t_z - záložní čas, zahrnující nepřesnosti předcházejících činitelů.

b) Nastavení rozběhového proudu nezávislých ochran

- Nastavení nadproudového stupně

Rozběhový proud I_r musí být větší než největší dovolené zatížení vedení:

$$I_r \geq \frac{k_b \cdot I_n}{k_p \cdot p_i} \quad (2.18)$$

kde I_n - největší dovolené zatížení vedení,
 k_b - koeficient bezpečnosti (1,1 až 1,35),
 k_p - přídržný poměr relé (0,85 až 0,95),
 p_i - jmenovitý převod jistícího transformátoru.

- Nastavení zkratového stupně

Rozběhový proud I_r nadproudového relé musí být menší než nejmenší očekávaný zkratový proud na konci chráněného úseku pro omezený provozní stav zapojení sítě. U sítí vysokého napětí, které jsou provozovány izolovaně je nejmenší zkratový proud při dvoupólovém zkratu. Aby relé při nejmenším zkratovém proudu na konci jištěného úseku spolehlivě nabíhalo, musí být splněna podmínka:

$$I_r < \frac{I_{k \min}}{k_c \cdot p_i} \quad (2.19)$$

kde $I_{k \min}$ - nejmenší zkratový proud na konci chráněného úseku

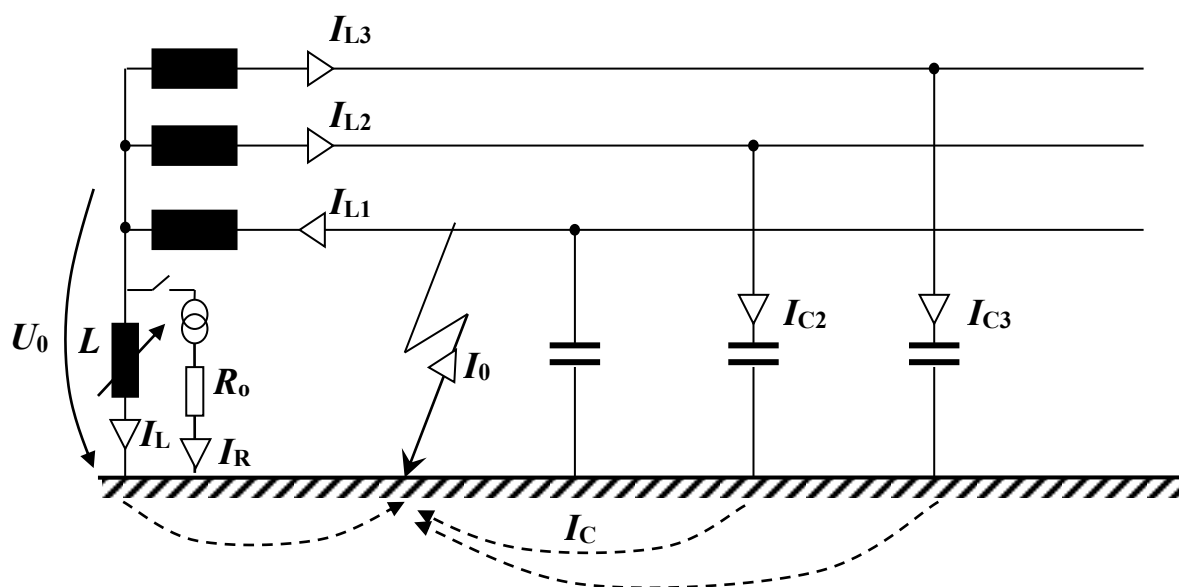
k_c - koeficient citlivosti nadproudových ochran (1,2 až 1,5).

2.7.3 Směrové nadproudové ochrany

Směrové nadproudové ochrany se používají v sítích, kde místo zkratu může být napájeno ze dvou stran. Použitím nesměrových nadproudových ochran by došlo k neselektivnímu vypínání. Tyto ochrany jsou vybaveny směrovým článkem, který umožňuje působení ochrany v definovaném směru. V opačném případě blokuje působení ochrany. Směrový článek elektromechanických ochran je realizován indukčním či elektrodynamickým relé. Směrové ochrany jsou konstruovány s nezávislými relé. (pozn.: u digitálních ochran mohou být směrové ochrany závislé i nezávislé). Časová selektivita a proudové nastavení je totožné jako u nesměrových nadproudových ochran.

2.8 Zemní ochrana

Zemní spojení může nastat v sítích s izolovaným uzlem transformátoru anebo spojených se zemí přes velkou impedanci. Takto je u nás provozována většina sítí vysokého napětí, které jsou jednostranně napájené. Zemní spojení je doprovázeno výrazným poklesem fázového napětí postižené fáze, zvýšením fázových napětí ve zdravých nepostižených fázích přibližně na velikost sdruženého napětí. Dále pak vznikem nulové složky proudu, jenž je třetinou poruchového proudu tekoucího místem zemního spojení.



Obr. 2.6 Zjednodušené schéma vedení se zemní poruchou [6]

Kompenzované systémy jsou uzemněny přes tlumivku s proměnou impedancí, která kompenzuje kapacitu mezi fázemi a zemí celého systému. Rezonanční uzemnění zajišťuje samozhášení oblouku na vedeních přibližně v 80 % poruch. K detekci zemního spojení v kompenzovaných sítích používáme wattové relé, které měří součin $U_0 \cdot I_0 \cdot \cos \varphi_0$. U těchto sítí protéká místem zemního spojení pouze malý zbytkový proud, jehož velikost závisí na odporech kompenzační tlumivky, vedení a transformátoru. Pro zvýšení činného proudu se při zemním spojení na krátkou dobu připojuje paralelně k tlumivce odporník.

Neuzemněné systémy jsou spojeny se zemí pouze přes kapacity jednotlivých fází vůči zemi. Samozhášení oblouku zemních poruch je možné jen pro malé hodnoty poruchových proudů. Zemní spojení je v nekompenzovaných sítích detekováno pomocí jalového relé, které měří součin $U_0 \cdot I_0 \cdot \sin \varphi_0$. [5], [6]

2.9 Automatika opětovného zapnutí

Automatika opětovného zapnutí se používá k odstranění přechodných poruch, které vznikají na venkovních vedeních. Opětovné zapnutí provádí automatika, která při zkratu ve spolupráci s ochranami kontroluje vypnutí vedení a po určité předem nastavené době provádí opětovné zapnutí. Trvá-li zkrat, provádí ochrana definitivní vypnutí nebo se cyklus znovu opakuje.

Automatika pracuje v jednoduchém či vícenásobném cyklu. Jednopolové vypínání se používá pouze pro vedení velmi vysokého napětí. Vedení VN se vypíná trojpolově. Hlavní význam automatik opětovného zapnutí spočívá ve zkrácení doby výpadku u přechodných poruch, příznivě přispívá k udržení stability chodu elektrizační soustavy. Princip automatik opětovného zapnutí je založen na přerušení oblouku, který může vzniknout na vedení. Doba beznapěťové pauzy musí být dostatečná, aby deionizovaná dráha oblouku přechodného zkratu zanikla. U vedení VVN se volí beznapěťový časový interval 0,3 až 0,6 sekund. U vedení VN se doporučuje používat 0,8 až 1 sekund. [5]

3. Teoretický rozbor výpočtu zkratových proudů

Metodika výpočtu zkratových poměru v trojfázových střídavých soustavách vychází z platné normy ČSN EN 60909 – 0. Podle této normy řešíme zkratové poměry v trojfázových střídavých soustavách nízkého, vysokého, velmi vysokého a zvláště vysokého napětí při jmenovitém kmitočtu. [7]

3.1 Druhy zkratů

Souměrný zkrat

- **Trojpolový zkrat** nastane při spojení všech tří fází elektrizační soustavy v jednom místě. Všechny tři vodiče jsou stejně postiženy a vedou stejný zkratový proud. Tento druh zkratu se nejčastěji vyskytuje v kabelových sítích. Může dojít ke zničení izolace mezi všemi fázemi. Dosahuje nejvyšších hodnot předpokládaného zkratového proudu.
- **Trojfázový zemní zkrat** nastává při spojení všech tří fází a jejich současným spojením se zemí.

Nesouměrný

- **Dvojpolový zkrat** vzniká při spojení kterýchkoliv dvou fází soustavy v jednom místě.
- **Dvojpolový zemní zkrat** vzniká, jsou-li dvě fáze současně spojeny se zemí.
- **Jednofázový zkrat** vzniká při spojení jedné fáze se zemí v soustavě s uzemněným uzlem.
- **Simultánní zkrat** je zvláštní případ dvojfázového zemního zkratu, kdy dojde ke spojení dvou různých fází trojfázové soustavy se zemí na dvou různých místech.

3.2 Způsoby spojení částí s různým potencionálem

V místě zkratu vznikají přechodné odpory, jejichž velikost závisí na způsobu spojení fází či fáze se zemí.

- **Dokonalý zkrat** vzniká dokonalým spojením fází nebo fáze se zemí. Impedance v místě spojení je zanedbatelná. Bývá nejčastěji způsoben kovovým předmětem.
- **Nedokonalý zkrat** vzniká nedokonalým spojením částí s různými potenciály. Impedance zkratového spojení je značná a má vliv na velikost zkratového proudu. Tento druh spojení způsobí např. větev stromu.
- **Obloukový zkrat** vzniká spojením nebo přiblížením vodičů na přeskokovou vzdálenost, což má za následek snížení izolační pevnosti a vznik elektrického oblouku. Určení přesné velikosti odporu oblouku je velmi obtížné. Proud i délka oblouku se v průběhu zkratu mění, mění se tedy i jeho odpor.

3.3 Definice základních pojmů

Zkratový proud: nadproud v důsledku zkratu v elektrizační soustavě.

Předpokládaný zkratový proud: proud, který by protékal obvodem, kdyby byl zkrat nahrazen ideálním spojením se zanedbatelnou impedancí bez změny napájení.

Souměrný zkratový proud: efektivní hodnota střídavé souměrné složky předpokládaného zkratového proudu se zanedbanou eventuální aperiodickou složkou proudu.

Počáteční souměrný rázový zkratový proud I_k'' : efektivní hodnota střídavé souměrné složky předpokládaného zkratového proudu v okamžiku vzniku zkratu, při konstantní impedanci.

Stejnosměrná (aperiodická) složka i_{dc} zkratového proudu: střední hodnota horní a dolní obalové křivky průběhu zkratového proudu klesající ze své počáteční hodnoty k nule.

Nárazový zkratový proud i_p : maximální možná okamžitá hodnota předpokládaného zkratového proudu.

Souměrný zkratový vypínací proud I_p : efektivní hodnota úplné periody souměrné složky předpokládaného zkratového proudu v okamžiku oddělení kontaktů prvního spínacího zařízení.

Ustálený zkratový proud I_k : efektivní hodnota zkratového proudu, který zůstává po odeznění přechodného jevu.

Ekvivalentní oteplovací proud I_{th} : Efektivní hodnota proudu, který má stejné tepelné účinky a stejnou dobu trvání jako skutečný zkratový proud, který může obsahovat stejnosměrnou složku a s časem se mění.

Jmenovité napětí sítě U_n : sdružené napětí, kterým je síť označena a k němuž se vztahují provozní charakteristiky.

Napěťový součinitel c : poměr mezi napětím ekvivalentního napěťového zdroje a jmenovitým napětím sítě U_n děleným $\sqrt{3}$.

Počáteční souměrný rázový zkratový výkon S_k'' : pomyslná hodnota definovaná jako součin počátečního souměrného rázového zkratového proudu I_k'' , jmenovitého napětí sítě U_n a součinitele $\sqrt{3}$.

Elektricky vzdálený zkrat: zkrat, při kterém velikost souměrné složky předpokládaného zkratového proudu zůstává v podstatě konstantní.

Elektrický blízký zkrat: zkrat, při kterém příspěvek alespoň jednoho synchronního stroje k předpokládanému počátečnímu souměrnému rázovému zkratovému proudu překračuje dvojnásobek jmenovitého proudu stroje, nebo zkrat, při kterém příspěvek asynchronních motorů překračuje 5 % počátečního souměrného rázového zkratového proudu I_k'' bez motoru.

3.4 Předpoklady výpočtu zkratových proudů

Výpočet maximálních a minimálních zkratových proudů vychází z následujících zjednodušení:

- po dobu trvání zkratového proudu se nemění typ zkratu, tj. trojfázový zkrat zůstává trojfázovým a zkrat mezi fází a zemí zůstává po celou dobu zkratu zkratem mezi fází a zemí
- po dobu zkratu nedochází k žádné změně v síti
- uvažuje se impedance transformátorů s přepínačem odboček v základní poloze
- odpory oblouku se neuvažují
- všechny kapacity vedení, paralelní admitance a netočivé statické zátěže jsou zanedbány vyjma paralelních admitancí v netočivé soustavě

Výpočty zajišťují dostatečnou přesnost výsledků, i když tyto předpoklady pro uvažované elektrické soustavy neodpovídají zcela přesně dané skutečnosti. Pokud se počítají zkratové proudy v soustavách s rozdílnými hladinami napětí, je nutné přepočítat hodnoty impedancí z jedné napěťové hladiny na jinou, obvykle na tu napěťovou hladinu, ve které se má určit zkratový proud.

3.5 Metoda výpočtu

3.5.1 Ekvivalentní napěťový zdroj v místě zkratu

Metoda spočívá v zavedení ekvivalentního napěťového zdroje v místě zkratu. Ekvivalentní napěťový zdroj je jediným aktivním napětím soustavy. Všechny síťové napáječe, synchronní a asynchronní stroje jsou nahrazeny svou vnitřní impedancí. Ekvivalentní napěťový zdroj se ve všech případech použije k určení zkratového proudu v místě zkratu. Provozní údaje o odběrech, o poloze přepínače odboček transformátorů, buzení generátorů můžeme postrádat. Není nutné provádět výpočty toků výkonů v různých stavech před zkratem.

3.5.2 Použití souměrných složek

Výpočet proudů v trojfázových střídavých soustavách při souměrných a nesouměrných zkratech lze zjednodušit pomocí souměrných složek. Předpokládáme, že elektrické zařízení má symetrickou strukturu. Při použití této metody se zjistí proudy v každé fázi superponováním proudů tří souměrných složkových soustav:

- proud sousledné složkové soustavy $\underline{I}_{(1)}$
- proud zpětné složkové soustavy $\underline{I}_{(2)}$
- proud netočivé složkové soustavy $\underline{I}_{(0)}$

Fázi L_1 budeme považovat za referenční, potom jsou proudy \underline{I}_{L1} , \underline{I}_{L2} , \underline{I}_{L3} :

$$\underline{I}_{L1} = \underline{I}_{(1)} + \underline{I}_{(2)} + \underline{I}_{(0)} \quad (3.1)$$

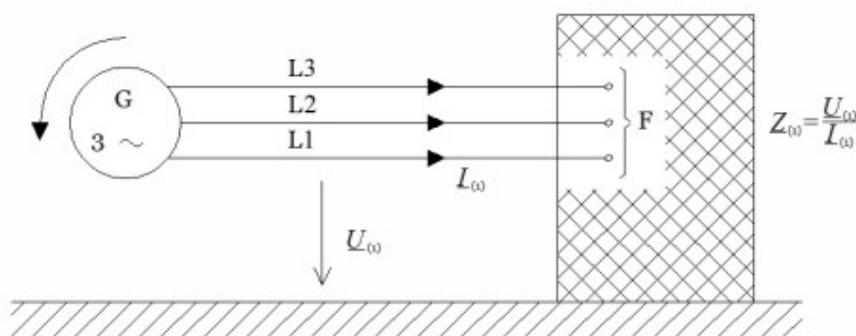
$$\underline{I}_{L2} = \underline{a}^2 \cdot \underline{I}_{(1)} + \underline{a} \cdot \underline{I}_{(2)} + \underline{I}_{(0)} \quad (3.2)$$

$$\underline{I}_{L3} = \underline{a} \cdot \underline{I}_{(1)} + \underline{a}^2 \cdot \underline{I}_{(2)} + \underline{I}_{(0)} \quad (3.3)$$

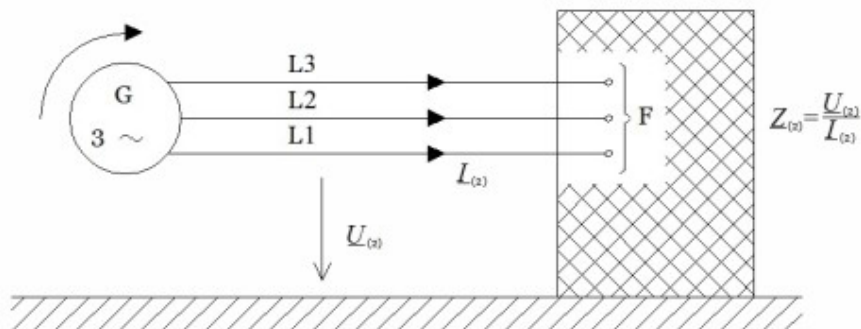
$$\underline{a} = -\frac{1}{2} + j\frac{1}{2}\sqrt{3} \quad (3.4)$$

$$\underline{a}^2 = -\frac{1}{2} - j\frac{1}{2}\sqrt{3} \quad (3.5)$$

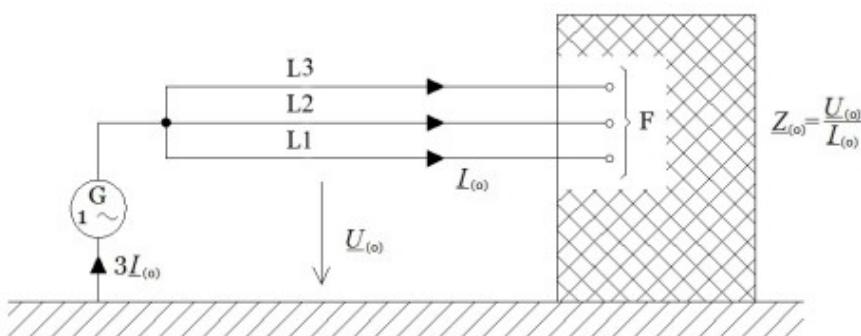
Každá z těchto tří souměrných složek soustavy má svou vlastní impedanci, kterou určíme při napájení jednotlivých prvků zdroji se souslednou, zpětnou a netočivou soustavou napětí. Je nutné rozlišovat zkratové impedance v místě zkratu F a zkratové impedance každého elektrického zařízení. Při výpočtech nesouměrných zkratových proudů v soustavách vysokého, velmi vysokého a zvláště vysokého napětí s použitím ekvivalentního napěťového zdroje v místě zkratu se musí uvažovat kapacita netočivé složky vedení pro soustavu s izolovaným uzlem, rezonančně uzemněné soustavy a soustavy s uzemněným uzlem se zemnicím faktorem vyšším než 1,4.



Obr. 3.1 Sousledná složka zkratové impedance [7]



Obr. 3.2 Zpětná složka zkratové impedance [7]



Obr. 3.3 Netočivá složka zkratové impedance [7]

3.6 Maximální zkratové proudy

Při určování nejvyšší možné hodnoty zkratového proudu se vychází z nejnepříznivějšího stavu elektrizační soustavy. Největší možnou hodnotu zkratového proudu určujeme pro volbu a dimenzování elektrických zařízení. Při výpočtu maximálních zkratových proudů je nutné zvolit následující podmínky:

- pro výpočet maximálních zkratových proudů se musí použít maximální napěťový činitel
- vybrat konfiguraci soustavy a maximální příspěvky z elektráren a síťových napáječů tak, aby vedly k maximální hodnotě zkratového proudu v místě zkratu
- chod motorů
- uvažují se odpory vedení (venkovních vedení a kabelů) při teplotě 20 °C.

3.7 Minimální zkratové proudy

Při určování nejmenší možné velikosti zkratového proudu se vychází z omezeného stavu elektrizační soustavy. Minimální hodnotu zkratového proudu určujeme pro volbu a nastavení ochran ve zkratovém obvodu. Při výpočtu minimálních zkratových proudů je nutné zvolit následující podmínky:

- pro výpočet minimálních zkratových proudů se musí použít minimální napěťový součinitel
- vybrat konfiguraci soustavy a minimální příspěvky z elektráren a síťových napáječů tak, aby vedly k minimální hodnotě zkratového proudu v místě zkratu
- vliv motorů se zanedbává
- odpor venkovních vedení nebo kabelů se musí uvažovat při nejvyšší teplotě

3.8 Výpočet parametrů prvků soustavy

Zkratový proud můžeme počítat pomocí skutečných hodnot prvků udaných v ohmech. Výpočet vychází přímo z Ohmova zákona, kde impedance, reaktance atd. uvažujeme v ohmech. Při výpočtu zkratových proudů v soustavách s různými hladinami napětí je nutné provést přepočet impedancí, proudů a napětí z jedné hladiny do druhé.

3.8.1 Soustava (nadřazená síť)

$$Z_{(1)} = \frac{c \cdot U_n}{\sqrt{3} \cdot I''_{k3}} = \frac{c \cdot U_n^2}{\sqrt{3} \cdot S''_{k3}} \quad (\Omega; -, \text{ kV}, \text{ kA}) \quad (3.6)$$

kde c napěťový součinitel,
 U_n jmenovité napětí nahrazované sítě,
 I''_k počáteční rázový zkratový proud soustavy,
 S''_k zkratový výkon soustavy.

3.8.2 Dvouvinutový transformátor

$$Z_{(I)} = \frac{u_k \cdot U_{nT}^2}{100 \cdot S_{nT}} \quad (\Omega; \%, \text{kV}, \text{kA}) \quad (3.7)$$

$$R_{(I)} = \frac{P_{knT} \cdot U_{nT}^2}{S_{nT}^2} \quad (\Omega; \text{kW}, \text{kV}, \text{kA}) \quad (3.8)$$

$$X_{(I)} = \sqrt{Z_{(I)}^2 - R_{(I)}^2} \quad (\Omega) \quad (3.9)$$

kde u_k jmenovité napětí nakrátko,
 U_{nT} jmenovité napětí transformátoru,
 S_{nT} jmenovitý zdánlivý výkon transformátoru,
 P_{knT} jmenovité ztráty nakrátko.

3.8.3 Reaktor omezující zkratový proud

$$Z_{R(I)} = \frac{u_{kR} \cdot U_n}{100 \cdot \sqrt{3} \cdot I_R} \quad (\Omega; \%, \text{kV}, \text{kA}) \quad (3.10)$$

kde u_{kR} impedanční napětí reaktoru,
 U_n jmenovité napětí reaktoru,
 I_n jmenovitý proud reaktoru.

3.8.4 Vedení

$$R_{(I)} = R_k \cdot l \quad (\Omega; \Omega \cdot \text{km}^{-1}, \text{km}) \quad (3.11)$$

$$X_{(I)} = X_k \cdot l \quad (\Omega; \Omega \cdot \text{km}^{-1}, \text{km}) \quad (3.12)$$

kde l délka vedení,

R_k rezistence vedení délky na 1 km,

X_k reaktance vedení délky na 1 km.

Přepočít na napětíovou hladinu v místě zkratu:

$$Z_2 = Z_1 \cdot \left(\frac{U_2}{U_1} \right)^2 \quad (\Omega; \Omega, \text{kV}, \text{kV}) \quad (3.13)$$

kde Z_2 impedance přepočtená na napětíovou hladinu U_2 v místě zkratu,

Z_1 impedance napětíové hladiny U_1 .

3.9 Výpočet parametrů prvků soustavy

3.9.1 Počáteční souměrný rázový zkratový proud I_k''

Počáteční rázový zkratový proud I_{k3}'' při trojfázovém zkratu

$$I_{k3}'' = \frac{c \cdot U_n}{\sqrt{3} \cdot |Z_{(1)}|} \quad (\text{kA}; -, \text{kV}, \Omega) \quad (3.14)$$

Počáteční rázový zkratový proud I_{k2}'' při dvoufázovém zkratu

$$I_{k2}'' = \frac{c \cdot U_n}{|Z_{(1)} + Z_{(2)}|} \quad (\text{kA}; -, \text{kV}, \Omega) \quad (3.15)$$

Počáteční rázový zkratový proud I_{k1}'' při jednofázovém zkratu

$$I_{k1}'' = \frac{c \cdot \sqrt{3} \cdot U_n}{|Z_{(1)} + Z_{(2)} + Z_{(0)}|} \quad (\text{kA}; -, \text{kV}, \Omega) \quad (3.16)$$

kde c napětíový součinitel,

- U_n jmenovité napětí v místě zkratu,
 $Z_{(1)}$ výsledná sousledná impedance zkratového obvodu,
 $Z_{(2)}$ výsledná zpětná impedance zkratového obvodu,
 $Z_{(3)}$ výsledná netočivá impedance zkratového obvodu.

3.9.2 Nárazový zkratový proud i_p

Je maximální možná okamžitá hodnota zkratového proudu při největší stejnosměrné složce. Hodnota tohoto proudu určuje velikost namáhání všech částí zkratového obvodu elektrodynamickými silami.

$$i_p = \sqrt{2} \cdot \kappa \cdot I_k'' \quad (\text{kA}; -, \text{kA}) \quad (3.17)$$

- kde κ je součinitel nárazového zkratového proudu,
 I_k'' počáteční souměrný rázový zkratový proud.

Součinitel nárazového zkratového proudu κ se určuje z grafů nebo pomocí následujícího vzorce:

$$\kappa = 1,02 + 0,98 \cdot e^{-\frac{3 \cdot R}{X}} \quad (-; \Omega, \Omega) \quad (3.18)$$

- kde R je činná složka impedance větví sítě,
 X jalová složka impedance větví sítě.

3.9.3 Ekvivalentní oteplovací proud I_{th}

Ekvivalentní oteplovací proud I_{th} je definován vztahem:

$$I_{th} = I_k'' \cdot \sqrt{m + n} \quad (\text{kA}; \text{kA}, -, -) \quad (3.19)$$

- kde m je součinitel pro tepelné účinky stejnosměrné složky zkratového proudu
 n je součinitel pro tepelné účinky střídavé složky zkratového proudu

4.1 Rozvodna 110kV

Rozvodna je provedena jako venkovní jednosystémová, typu H. Rozvodna obsahuje celkem osm polí. Z toho šest je ve vlastnictví ČEZ Distribuce. Je to vývodové pole AEA01 (V598 směr Červenka), rezervní vývodové pole AEA03 (vybavená rezerva pro připravovaný druhý potah vedení směr Červenka), pole AEA02 (T101), AEA 04 (T102), pole AEA 05 (podélné dělení rozvodny typu H), a pole AEA06 (podélné dělení).

Stávající ochrany rozvodny

Vybavení pole AEA01 (V598) a AEA 03 (Rezerva)

QM	Siemens, 3 AP1 FG
Q1	Siemens, D BF4-123
Q6	Siemens, D BF4-123
QE6	Siemens, AE BF2
TV1	Pfiffner EOF 123
TA1	Pfiffner, JOF 123
F251	Siemens, 7SA611 (distanční ochrana)

Vybavení pole AEA02 (T101) a AEA04 (T102)

QM	Siemens, 3 AP1 FG
Q1	Siemens, D BF4-123
FV1	SBK-IV 102/10,3
TA1	Pfiffner JOF 123
F101	Siemens, 7SJ632 (kombinovaná ochrana)
F301	Siemens, 7UT613 (rozdílová ochrana transformátoru)
F461	Eberle, REG-D - automatická regulace napětí transformátoru
F361	P921 – nadpětíová ochrana

Vybavení pole AEA05 (PD1)

Q11	Siemens, D BF4-123
Q12	Siemens, D BF4-123

Vybavení pole AEA06 (PD2)

Q13	Siemens, D BF4-123
Q14	Siemens, D BF4-123

4.2 Transformace 110/22 kV

Transformace 110/22 kV je zajištěna pomocí dvou transformátorů o výkonu 40 MVA. Transformátory T101 a T102 jsou umístěny na venkovních, nezastřešených stanovištích. Dispozičně navazují na pole rozvodny 110 kV. Transformovaný výkon z transformátorů je vyveden do rozvodny 22 kV – pole 7r5 (T102), pole 8r5 (T101). Vyvedení sekundární strany

transformátorů je na stanovištích provedeno kabelovým propojením. Uzel transformátoru VVN je uzemněn přímo. Uzel transformátoru VN je uzemněn nepřímo přes zhášecí tlumivku. V případě vzniku zemního spojení se ke zhášecí tlumivce paralelně připojí na krátkou dobu sekundární odporník. Zhášecí tlumivka je laděna automatikou ladění. Spínání odporníku je prováděno rovněž touto automatikou. Pro kompenzaci zemního spojení v síti 22 kV jsou instalovány 2 zhášecí tlumivky ASR 4.0, 5 000 kVA_r. Pro vlastní spotřebu transformovny jsou instalovány transformátory TVS1 (T11) a TVS2 (T12), 22/0,4 kV, o výkonu 400 kVA. Transformátory T01 a T02 jsou chráněny pomocí ochran 7UT613 a 7SJ636. Jako hlavní ochrana transformátorů je použita rozdílová a kostrová ochrana. Transformátory jsou dále chráněny také záložními zkratovými a nadproudovými ochranami.

4.3 Rozvodna 22kV

Rozvodna je provedena jako vnitřní, skříňová, typu RIO 644. Má jeden systém hlavních přípojníc, rozdělených do dvou sekcí (W11, W12). Dále je vybavena spínačem přípojníc. Jmenovitý proud přípojníc je 1250 A. Zkratový proud rozvodny je 20 kA, I_{dyn} 50kA. Rozvodna obsahuje 28 skříní:

- 2 skříně vývody na transformátoru T101, T102 (7r5,8r5)
- 1 skříň vývod na TVS2 (19r5)
- 2 skříně spojka přípojníc (21r5,22r5)
- 2 skříně měření (23r5,24r5)
- 2 skříně vývod HDO (25r5,26r5)
- 8 skříní vývodů (27r5,17r5,13r5,11r5,20r5,18r5,16r5,14r5)
- 9 skříní rezervních vývodů (1r5,2r5,3r5,4r5,5r5,6r5,9r5,15r5,28r5)
- 2 skříně neobsazené 10r5,12r5

Stávající řídicí systém je systém mikrodispečink na bázi PC. Signalizace je centralizovaná do procesních jednotek A96. Povelý jsou provedeny přes reléové matice, moduly MCS 4U REL900I v MCS, propojením se stávající reléovou skříní. Měření je provedeno moduly MCS_DCUI, umístěnými ve vaně MCS společně s ovládacími moduly. Pomocné napětí 110V DC a 24V DC.

4.5 Stávající ochrany rozvodny

Tab. 4.1 Stávající ochrany rozvodny

	F181	TV11/TV12	F341
Měř. W11 (kobka23)	ER 323	ZSE TJP6	GV12
Měř. W12 (kobka24)	ER 323	ZSE TJP6	GV12

Tab. 4.2 Stávající ochrany rozvodny

	F111	F281	F121	F181	QM	TV1	TA1	F151
Rezerva01 (1r5)	AT31X	OZ 33X	A32	ER 323	EJF HL 6-9	ZSE TDP6	ZSE TTR61.12	
Rezerva02 (2r5)	AT31X	OZ 33X	A32	ER 323	EJF HL 6-9	ZSE TDP6	ZSE TTR61.12	
Rezerva03 (3r5)	AT31X	OZ 33X	A32	ER 323	EJF HL 6-9	ZSE TDP6	ZSE TTR61.12	
Rezerva04 (4r5)	AT31X	OZ 33X	A32	ER 323	EJF HL 6-9	ZSE TDP6	ZSE TTR61.12	
Rezerva05 (5r5)	AT31X	OZ 33X	A32	ER 323	EJF HL 6-9	ZSE TDP6	ZSE TTR61.12	
Rezerva06 (6r5)	AT31X	OZ 33X	A32	ER 323	EJF HL 6-9	ZSE TDP6	ZSE TTR61.12	
SměrT102 (7r5)				ER 323	ABB VDM	ZSE TJP6	ABB TTR63.12	
SměrT101 (8r5)				ER 323	EJF HL 6-9	ZSE TJP6	ZSE TTR63.12	
Rezerva09 (9r5)	AT31X	OZ 33X	A32	ER 323	ABB VDM	ZSE TDP6	ZSE TTR61.11	
VN956 (11r5)	AT31X	OZ 33X	A32	ER 323	EJF HL 6-9	ZSE TDP6	ZSE TTR61.12	RYO
VN37 (13r5)	AT31X	OZ 33X	A32	ER 323	EJF HL 6-9	ZSE TDP6	ZSE TTR61.12	RYO
VN77 (kobka14)	AT31X	OZ 33X	A32	ER 323	EJF HL 6-9	ZSE TDP6	ZSE TTR61.12	RYO
Rezerva15 (kobka15)	AT31X	OZ 33X	A32	ER 323	EJF HL 6-9	ZSE TDP6	ZSE TTR61.12	
VN321 (kobka16)	AT31X	OZ 33X	A32	ER 323	EJF HL 6-9	ZSE TDP6	ZSE TTR61.12	RYO
VN309 (kobka17)	AT31X	OZ 33X	A32	ER 323	EJF HL 6-9	ZSE TDP6	ZSE TTR61.12	RYO
VN315 (kobka18)	AT31X	OZ 33X	A32	ER 323	EJF HL 6-9	ZSE TDP6	ZSE TDP6	RYO
Směr TVS2 (kobka19)	AT31X			ER 323	EJF HL 6-9		ZSE TSR61.1R	
VN1204(10) (kobka20)	AT31X	OZ 33X	A32	ER 323	EJF HL 6-9	ZSE TDP6	ZSE TTR61.12	RYO
SP1 (kobka21)				ER 323				
SP2 (kobka22)	AT31X			ER 323	ABB VDM	ZSE TJP6	ZSE TTR63.12	
HDO1 (kobka25)			A32	ER 323	EJF HL 6-9	ZSE TJP6	ZSE TSR61.2R	
HDO2 (kobka26)			A32	ER 323	EJF HL 6-9	ZSE TJP6	ZSE TSR61.2R	
VN80 (kobka27)	AT31X	OZ 33X	A32	ER 323	EJF HL 6-9	ZSE TDP6	ZSE TTR61.12	RYO
Rezerva28 (kobka28)	AT31X	OZ 33X	A32	ER 323	EJF HL 6-9	ZSE TDP6	ZSE TTR61.12	

5. Popis navržených ochran pro rozvodnu

Vedení, TVS, HDO a přívody z transformátorů budou chráněny pomocí ochrany SIEMENS SIPROTEC 7SJ636. Ve spojení bude použita ochrana SIEMENS SIPROTEC 7SJ645. Především proto, že má výkonnější procesor a je schopna zvládnout blokovací podmínky, které jsou ve spojení vždy nejsložitější. V měření bude použit typ 7SJ804 bez ochranných funkcí. [10], [11].

5.1 Popis ochran

Tyto digitální ochrany jsou vybaveny výkonnými mikroprocesory. Všechny úkoly od detekce přes vzorkování a digitalizaci měřených veličin až po vydání příkazu pro výkonový vypínač jsou zpracovávány digitálně. Ochrany SIEMENS SIPROTEC jsou vybaveny nadproudovou, zemní, směrovou nadproudovou, jednofázovou nadproudovou, napětíovou, frekvenční, citlivou zemní ochranou, ochranou proti nesymetrii a tepelnému přetížení, ochranou přerušovaného zemního spojení, ochranou při selhání vypínače, automatikou opětovného zapnutí, lokátorem poruch, kontrolou času rozběhu pro motory, blokováním opětovného zapnutí motorů, dynamickým přepínáním parametrů.

5.2 Vlastnosti ochran

- Výkonný 32bitový mikroprocesorový systém
- Digitální zpracování měřených hodnot a ovládání
- Galvanické oddělení a zabezpečení proti rušení
- Plný rozsah funkcí pro úkoly, které jsou nutné pro chránění a ovládání vývodů
- Jednoduchá obsluha pomocí ovládacího a zobrazovacího panelu
- Trvalý výpočet a zobrazování měřených a vypočtených hodnot
- Ukládání minimálních, maximálních a dlouhodobých středních měřených hodnot
- Ukládání poruchových hlášení posledních 8 poruch v síti
- Trvalá kontrola měřených veličin, hardwaru a softwaru přístroje
- Komunikace s centrálními řídicími a paměťovými zařízeními
- Hodiny jištěné baterií
- Statistika spínání

- Počítadlo provozních hodin

5.3 Ochranné funkce

Nadproudová ochrana

- Dva nezávislé stupně a jeden závislý stupeň pro fázový, zemní a součtový proud
- Možnost použití v dvoufázovém provozu
- Volba charakteristiky pro proudově závislou ochranu
- Možnost blokování
- Možnost nezpóźděného vypnutí při zapnutí do zkratu libovolným stupněm
- Zapínací stabilizace druhou harmonickou

Zemní zkratová ochrana

- Dva nezávislé a jeden proudově závislý stupeň pro vysokoohmové zemní poruchy
- Volba charakteristiky pro proudově závislou ochranu
- Zapínací stabilizace druhou harmonickou
- Možnost nezpóźděného vypnutí při zapnutí do zkratu libovolným stupněm

Směrová nadproudová ochrana

- Tři fázové a zemní stupně pracují paralelně s nesměrovou nadproudovou
- Určení směru se provádí zvlášť pro každou fázi a odděleně pro fázové a zemní poruchy
- Určení směru se provádí selektivně po fázích a odděleně pro fázové, zemní a součtový proud

Citlivá zemní ochrana

- Detekuje zbytkové napětí měřením nebo výpočtem z fázových napětí
- Určuje fáze postižené zemním spojením v izolovaných či kompenzovaných sítích
- Obsahuje dvoustupňové měření zemních proudů
- Vysoká citlivost
- Nadproudový stupeň s nezávislým nebo proudově závislým zpóźděním

- Určení směru složky nulového systému (wattmetrické určení směru zemního spojení)
- Každý stupeň může být nastaven směrově nebo nesměrově
- Volitelně nastavitelná jako zemní zkratová ochrana

Automatika opětovného zapnutí

- Jednonásobná nebo vícenásobná
- Oddělené časy pro první a další impulsy
- Oddělené programy pro fázové a zemní poruchy
- Nastavitelnost spolupráce nadproudového a zemního stupně s automatikou OZ
- Interakce ke stupňům nadproudové a zemní ochrany - blokování nebo nezpožděné vypnutí

Ochrana proti nesymetrii

- Vyhodnocuje zpětné složky proudů
- Dvoustupňová nezávislá vypínací charakteristika

5.4 Použití ochran

Digitální multifunkční ochrana se nasazuje jako přístroj pro chránění, řízení a monitorování vývodů z přípojníc. Je možné ji použít jako ochranu vedení v sítích uzemněných, izolovaných, kompenzovaných nebo zemněných přes nízký odpor. Hodí se pro jednostranně napájené radiální sítě, otevřené nebo uzavřené kruhové sítě i pro oboustranně napájená vedení. Jako motorová ochrana je přístroj vhodný pro asynchronní stroje všech velikostí.

Přístroj obsahuje funkce, které jsou obvykle zapotřebí pro chránění, kontrolu a ovládání spínacích prvků v rozvodnách s jednoduchými nebo dvojitými přípojnícemi, a je tímto univerzálně použitelný. Může být také použit jako časově odstupňovaná záložní ochrana všech typů rozdílových ochran vedení, transformátorů, generátorů, motorů přípojníc všech napětových úrovních.

6. Výpočet zkratových poměrů

Tab. 6.1 Zkratové hodnoty rozvodny Šternberk

U (kV)	S_{ks3}	I_{ks3}	S_{ks1}	I_{ks1}
110	(MVA)	(kA)	(MVA)	(kA)
max	786,00	4,13	514,80	2,70
min	407,50	2,14	311,70	1,61

Tab. 6.2 Parametry transformátorů

Transformátor	S_{nT} (MVA)	U_{n1T} (kV)	U_{n2T} (kV)	u_k (%)	P_k (kW)	P_0 (kW)
T101	40	110,0	23,0	10,78	206	41
T102	40	110,0	23,0	11,11	110	19

Výpočet převodového poměru

$$p_p = \frac{U_{n1T}}{U_{n2T}} \cdot \frac{U_{v2}}{U_{v1}} = \frac{110}{23} \cdot \frac{23}{115} = 0,957$$

Výpočet minimální a maximální reaktance na straně 110 kV

$$X_{S1min} = \frac{c \cdot U_n}{\sqrt{3} \cdot I''_{k3max}} = \frac{1,1 \cdot 110}{\sqrt{3} \cdot 4,13} = 16,92 \, \Omega$$

$$X_{S1max} = \frac{c \cdot U_n}{\sqrt{3} \cdot I''_{k3min}} = \frac{1 \cdot 110}{\sqrt{3} \cdot 2,14} = 29,68 \, \Omega$$

Výpočet zkratových reaktancí sítě přepočtených na stranu 22 kV

$$X_{S2min} = \frac{U_{n2T}^2}{U_{n1T}^2} \cdot \frac{1}{p_p^2} \cdot X_{S1min} = \frac{23^2}{110^2} \cdot \frac{1}{0,957^2} \cdot 16,92 = 0,81 \, \Omega$$

$$X_{S2max} = \frac{U_{n2T}^2}{U_{n1T}^2} \cdot \frac{1}{p_p^2} \cdot X_{S1max} = \frac{23^2}{110^2} \cdot \frac{1}{0,957^2} \cdot 29,68 = 1,42 \, \Omega$$

Výpočty pro transformátor T101

$$R_{T101} = \frac{\Delta P_k \cdot U_{n2T}^2}{S_{nT}^2} = \frac{206 \cdot 10^3 \cdot (23 \cdot 10^3)^2}{(40 \cdot 10^6)^2} = 0,068 \, \Omega$$

$$Z_{T101} = \frac{u_k}{100} \cdot \frac{U_{n2T}^2}{S_{nT}} = \frac{10,78}{100} \cdot \frac{(23 \cdot 10^3)^2}{40 \cdot 10^6} = 1,426 \, \Omega$$

$$X_{T101} = \sqrt{Z_{T101}^2 - R_{T101}^2} = \sqrt{1,426^2 - 0,068^2} = 1,424 \, \Omega$$

Výpočty pro transformátor T102

$$R_{T102} = \frac{\Delta P_k \cdot U_{n2T}^2}{S_{nT}^2} = \frac{110 \cdot 10^3 \cdot (23 \cdot 10^3)^2}{(40 \cdot 10^6)^2} = 0,036 \, \Omega$$

$$Z_{T102} = \frac{u_k}{100} \cdot \frac{U_{n2T}^2}{S_{nT}} = \frac{11,11}{100} \cdot \frac{(23 \cdot 10^3)^2}{40 \cdot 10^6} = 1,469 \, \Omega$$

$$X_{T102} = \sqrt{Z_{T102}^2 - R_{T102}^2} = \sqrt{1,469^2 - 0,036^2} = 1,469 \, \Omega$$

Výpočet celkové zkratové reaktance na přípojnicích 22 kV ze strany T101

$$X_{\min} = X_{S2\min} + X_{T101} = 0,81 + 1,424 = 2,232 \, \Omega$$

$$X_{\max} = X_{S2\max} + X_{T101} = 1,42 + 1,424 = 2,842 \, \Omega$$

Výpočet celkové zkratové reaktance na přípojnicích 22 kV ze strany T102

$$X_{\min} = X_{S2\min} + X_{T102} = 0,81 + 1,469 = 2,277 \, \Omega$$

$$X_{\max} = X_{S2\max} + X_{T102} = 1,42 + 1,469 = 2,887 \, \Omega$$

Výpočet celkové impedance ze strany T101

$$Z_{\min} = \sqrt{X_{\min}^2 - R_{T101}^2} = \sqrt{2,232^2 - 0,068^2} = 2,233 \, \Omega$$

$$Z_{\max} = \sqrt{X_{\max}^2 - R_{T101}^2} = \sqrt{2,842^2 - 0,068^2} = 2,843 \, \Omega$$

Výpočet celkové impedance ze strany T102

$$Z_{\min} = \sqrt{X_{\min}^2 - R_{T102}^2} = \sqrt{2,277^2 - 0,036^2} = 2,277 \, \Omega$$

$$Z_{\max} = \sqrt{X_{\max}^2 - R_{T102}^2} = \sqrt{2,887^2 - 0,036^2} = 2,887 \, \Omega$$

Výpočet minimálního a maximálního zkratového proudu ze strany T101

$$I''_{k2\min} = \frac{c \cdot U_n}{2 \cdot Z_{\max}} = \frac{1 \cdot 23}{2 \cdot 2,843} = 4,05 \text{ kA}$$

$$I''_{k3\max} = \frac{c \cdot U_n}{\sqrt{3} \cdot Z_{\min}} = \frac{1,1 \cdot 23}{\sqrt{3} \cdot 2,233} = 6,54 \text{ kA}$$

Výpočet minimálního a maximálního zkratového proudu ze strany T102

$$I''_{k2\min} = \frac{c \cdot U_n}{2 \cdot Z_{\max}} = \frac{1 \cdot 23}{2 \cdot 2,887} = 3,98 \text{ kA}$$

$$I''_{k3\max} = \frac{c \cdot U_n}{\sqrt{3} \cdot Z_{\min}} = \frac{1,1 \cdot 23}{\sqrt{3} \cdot 2,277} = 6,41 \text{ kA}$$

Výpočet minimálního a maximálního zkratového výkonu ze strany T101

$$S''_{k\min} = \sqrt{3} \cdot U_n \cdot I''_{k2\min} = \sqrt{3} \cdot 23 \cdot 10^3 \cdot 4,05 = 161,15 \text{ MVA}$$

$$S''_{k\max} = \sqrt{3} \cdot U_n \cdot I''_{k3\max} = \sqrt{3} \cdot 23 \cdot 10^3 \cdot 6,54 = 260,55 \text{ MVA}$$

Výpočet minimálního a maximálního zkratového výkonu ze strany T102

$$S''_{k\min} = \sqrt{3} \cdot U_n \cdot I''_{k2\min} = \sqrt{3} \cdot 23 \cdot 10^3 \cdot 3,98 = 158,68 \text{ MVA}$$

$$S''_{k\max} = \sqrt{3} \cdot U_n \cdot I''_{k3\max} = \sqrt{3} \cdot 23 \cdot 10^3 \cdot 6,41 = 255,51 \text{ MVA}$$

Výpočet minimální a maximální zkratové reaktance ze strany T101

$$X''_{k\min} = \frac{1,1 \cdot S''_{k\max}}{3 \cdot I''_{k3\max}{}^2} = \frac{1,1 \cdot 260,55 \cdot 10^6}{3 \cdot (6,54 \cdot 10^3)^2} = 2,233 \Omega$$

$$X''_{k\max} = \frac{S''_{k\min}}{3 \cdot I''_{k3\min}{}^2} = \frac{161,15 \cdot 10^6}{3 \cdot (4,05 \cdot 10^3)^2} = 3,283 \Omega$$

Výpočet minimální a maximální zkratové reaktance ze strany T102

$$X''_{k\min} = \frac{1,1 \cdot S''_{k\max}}{3 \cdot I''_{k3\max}{}^2} = \frac{1,1 \cdot 255,51 \cdot 10^6}{3 \cdot (6,41 \cdot 10^3)^2} = 2,277 \Omega$$

$$X''_{k\max} = \frac{S''_{k\min}}{3 \cdot I''_{k3\min}{}^2} = \frac{158,68 \cdot 10^6}{3 \cdot (3,98 \cdot 10^3)^2} = 3,334 \Omega$$

Příklad výpočtu pro vedení VN 321

Výpočet činných odporů jednotlivých úseků vedení VN 231

$$R_{v1} = R_{k1} \cdot l_{k1} = 0,125 \cdot 0,15 = 0,019 \Omega$$

$$R_{v2} = R_{k2} \cdot l_{k2} = 0,266 \cdot 1,382 = 0,368 \Omega$$

$$R_{v3} = R_{k3} \cdot l_{k3} = 0,266 \cdot 1,627 = 0,433 \Omega$$

$$R_{v4} = R_{k4} \cdot l_{k4} = 0,266 \cdot 2,123 = 0,565 \Omega$$

$$R_{v5} = R_{k5} \cdot l_{k5} = 0,266 \cdot 2,607 = 0,693 \Omega$$

$$R_{v6} = R_{k6} \cdot l_{k6} = 0,234 \cdot 0,716 = 0,168 \Omega$$

$$R_{v7} = R_{k7} \cdot l_{k7} = 0,234 \cdot 1,801 = 0,421 \Omega$$

$$R_{v8} = R_{k8} \cdot l_{k8} = 0,234 \cdot 0,947 = 0,222 \Omega$$

$$R_{v9} = R_{k9} \cdot l_{k9} = 0,234 \cdot 2,119 = 0,496 \Omega$$

$$R_{v10} = R_{v10} \cdot l_{k10} = 0,234 \cdot 2,071 = 0,485 \Omega$$

$$R_{v11} = R_{v11} \cdot l_{k11} = 0,234 \cdot 0,215 = 0,050 \Omega$$

$$R_{v12} = R_{v12} \cdot l_{k12} = 0,206 \cdot 0,116 = 0,024 \Omega$$

Součet činných odporů vedení VN231

$$\sum_{i=1}^{12} R_{vi} = 0,019 + 0,368 + 0,433 + 0,565 + 0,693 + 0,168 + 0,421 + 0,222 + 0,496 + 0,485 + 0,050 + 0,024 = 3,943 \Omega$$

Výpočet reaktancí jednotlivých úseků vedení

$$X_{v1} = X_{k1} \cdot l_{k1} = 0,113 \cdot 0,15 = 0,017 \Omega$$

$$X_{v2} = X_{k2} \cdot l_{k2} = 0,361 \cdot 1,382 = 0,499 \Omega$$

$$X_{v3} = X_{k3} \cdot l_{k3} = 0,361 \cdot 1,627 = 0,587 \Omega$$

$$X_{v4} = X_{k4} \cdot l_{k4} = 0,361 \cdot 2,123 = 0,766 \Omega$$

$$X_{v5} = X_{k5} \cdot l_{k5} = 0,361 \cdot 2,607 = 0,941 \Omega$$

$$X_{v6} = X_{k6} \cdot l_{k6} = 0,356 \cdot 0,716 = 0,255 \Omega$$

$$X_{v7} = X_{k7} \cdot l_{k7} = 0,356 \cdot 1,801 = 0,641 \Omega$$

$$X_{v8} = X_{k8} \cdot l_{k8} = 0,356 \cdot 0,947 = 0,337 \Omega$$

$$X_{v9} = X_{k9} \cdot l_{k9} = 0,356 \cdot 2,119 = 0,754 \, \Omega$$

$$X_{v10} = X_{k10} \cdot l_{k10} = 0,356 \cdot 2,071 = 0,737 \, \Omega$$

$$X_{v11} = X_{k11} \cdot l_{k11} = 0,356 \cdot 0,215 = 0,077 \, \Omega$$

$$X_{v12} = X_{k12} \cdot l_{k12} = 6,421 \cdot 0,116 = 0,745 \, \Omega$$

Součet reaktancí vedení VN231

$$\sum_{i=1}^{12} X_{vi} = 0,017 + 0,499 + 0,587 + 0,766 + 0,941 + 0,255 + 0,641 + 0,337 + 0,754 + 0,737 + 0,077 + 0,745 = 6,357 \, \Omega$$

Výpočet minimálního zkratového proudu pro první úsek vedení VN 321

$$I''_{k2 \min v1} = \frac{c \cdot U_n}{2 \cdot \sqrt{(R_{v1}^2 + R_{T101}^2) + (X_{v1}^2 + X_{\max}^2)}}$$

$$I''_{k2 \min v1} = \frac{1 \cdot 23}{2 \cdot \sqrt{(0,019^2 + 0,068^2) + (0,017^2 + 2,887^2)}} = 3,98 \, \text{kA}$$

Výpočet minimálního zkratového proudu pro poslední úsek vedení VN 321

$$I''_{k2 \min v12} = \frac{c \cdot U_n}{2 \cdot \sqrt{(R_{v12}^2 + R_{T101}^2) + (X_{v12}^2 + X_{\max}^2)}}$$

$$I''_{k2 \min v12} = \frac{1 \cdot 23}{2 \cdot \sqrt{(3,943^2 + 0,068^2) + (6,357^2 + 2,887^2)}} = 1,43 \, \text{kA}$$

Výpočet maximálního zkratového proudu pro první úsek vedení VN 321

$$I''_{k3 \max v1} = \frac{c \cdot U_n}{\sqrt{3} \cdot \sqrt{(R_{v1}^2 + R_{T101}^2) + (X_{v1}^2 + X_{\max}^2)}}$$

$$I''_{k3 \max v1} = \frac{1,1 \cdot 23}{\sqrt{3} \cdot \sqrt{(0,019^2 + 0,068^2) + (0,017^2 + 2,887^2)}} = 6,54 \, \text{kA}$$

Výpočet maximálního dovoleného vypínacího času pro první úsek vedení VN 321

$$t_{\text{vyp vl}} = \left(\frac{S \cdot K}{I''_{k3 \text{ max vl}} \cdot k_e} \right)^2 = \left(\frac{240 \cdot 94}{6,54 \cdot 10^3 \cdot 1,02} \right)^2 = 11,44 \text{ s}$$

Tab. 6.3 Parametry vedení

Typ	S	I_n	K	R_k	X_k
	(mm ²)	(A)	(-)	(Ω·km ⁻¹)	(Ω·km ⁻¹)
AXEKVCEY	240	417	94	0,125	0,113
AXEKVCEY	150	366	94	0,206	6,421
AXEKVCEY	120	285	94	0,253	0,126
AXEKVCEY	70	210	94	0,443	0,138
ANKTOYPV	240	353	87	0,129	0,088
ANKTOYPV	150	273	70	0,239	0,094
ANKTOYPV	120	241	87	0,299	0,097
AlFe	185	459	94	0,156	0,400
AlFe	120	357	94	0,234	0,356
AlFe110/22	110	318	94	0,266	0,361
AlFe	95	284	94	0,319	0,370
AlFe	70	225	94	0,474	0,378
AlFe 70/11	70	255	94	0,474	0,378
AlFe	50	177	94	0,696	0,389
AlFe42/7	42	163	94	0,715	0,392
AlFe	35	150	94	0,778	0,398

Specifikace jednotlivých úseku z rozvodny Šternberk

Tab. 6.4 Vedení VN10

OC_STER><OC_4440	Typ	<i>S</i>	<i>I_k</i>	<i>I_{k3 max}</i>	<i>I_{k2 min}</i>	<i>t_{typ}</i>
		(mm ²)	(m)	(kA)	(kA)	(s)
OC_STER><US_OC_5497	AXEKVCEY	240	175	6,54	3,98	11,44
US_OC_5497><odb. k US_OC_5510	AlFe	95	57	6,54	3,98	1,79
odb. k US_OC_5510><odb. k US_OC_5492	AlFe	95	3486	5,14	3,40	1,79
odb. k US_OC_5492>odb. k OC_0314	AlFe	95	940	4,64	3,16	2,90
odb. k OC_0314><odb. k US_OC_5090	AlFe	95	1978	3,75	2,67	3,56
odb. k US_OC_5090><odb. k US_OC_5353	AlFe	95	180	3,69	2,63	5,44
odb. k US_OC_5353><odb. k US_OC_5276	AlFe	95	334	3,56	2,56	5,64
odb. k US_OC_5276><odb. k US_OC_5057	AlFe	95	3074	2,70	2,01	6,03
odb. k US_OC_5057><odb. k US_OC_5005	AlFe	70	1371	2,37	1,79	5,73
odb. k US_OC_5005><odb. k US_OC_5307	AlFe	70	2044	1,99	1,52	7,44
odb. k US_OC_5307><odb. k US_OC_5416	AlFe	70	2918	1,62	1,25	10,49
odb. k US_OC_5416><odb. k US_OC_5297	AlFe	70	663	1,55	1,20	15,87
odb. k US_OC_5297><odb. k OC_4438	AlFe	50	221	1,53	1,18	8,81
odb. k OC_4438><OC_4440	AlFe42/7	42	2071	1,31	1,02	6,44
	AXEKVCEY	70	234	1,30	1,01	24,35

1: odb. k US_OC_5276><US_OC_5353	Typ	<i>S</i>	<i>I_k</i>	<i>I_{k3 max}</i>	<i>I_{k2 min}</i>	<i>t_{typ}</i>
		(mm ²)	(m)	(kA)	(kA)	(s)
odb. k US_OC_5276><US_OC_5351	AlFe	50	1081	3,04	2,24	1,67
US_OC_5351><OC_9889	ANKTOYPV	120	181	3,01	2,22	11,35
	AXEKVCEY	240	459	2,97	2,19	53,97
OC_9889><OC_9890	AXEKVCEY	240	430	2,93	2,17	55,51
	ANKTOYPV	120	355	2,88	2,13	12,20
OC_9890><OC_4247	ANKTOYPV	120	470	2,81	2,09	12,64
OC_4247><OC_4244	ANKTOYPV	120	274	2,77	2,06	13,25
OC_4244><US_OC_5353	ANKTOYPV	120	405	2,72	2,03	13,61

2: odb. k US_OC_5297>OC_4432	Typ	<i>S</i>	<i>I_k</i>	<i>I_{k3 max}</i>	<i>I_{k2 min}</i>	<i>t_{typ}</i>
		(mm ²)	(m)	(kA)	(kA)	(s)
odb. k US_OC_5297><OC_4432	AlFe	35	2086	1,31	1,02	4,32

Tab. 6.5 Vedení VN77

R STE><R UNI	Typ	S	I_k	$I_{k3 \max}$	$I_{k2 \min}$	t_{typ}
		(mm ²)	(m)	(kA)	(kA)	(s)
R STE><odb. k US_OC_5405	AXEKVCEY	240	151	6,54	3,98	11,44
	AlFe	70	136	6,53	3,98	0,97
odb. k US_OC_5405><odb. k OC_4451	AlFe110/22	110	1068	6,33	3,90	2,41
odb. k OC_4451><odb. k OC_5396	AlFe110/22	110	1301	5,80	3,69	2,57
odb. k OC_5396><odb. k OC_4457	AlFe110/22	110	1147	5,23	3,44	3,06
odb. k OC_4457><odb. k OC_4460	AlFe110/22	110	1244	4,62	3,15	3,76
odb. k OC_4460><odb. k US_OC_5283	AlFe110/22	110	2371	3,66	2,62	4,82
odb. k US_OC_5283><odb. k OS_OC_5400	AlFe110/22	110	2069	3,05	2,25	7,65
odb. k OS_OC_5400><OS_OC5395	AlFe110/22	110	1403	2,73	2,03	11,02
OS_OC5395><odb. k US_OC_5350	AlFe110/22	110	2198	2,33	1,76	13,77
odb. k US_OC_5350><odb. k OC_9751	AlFe110/22	110	525	2,26	1,71	18,85
odb. k OC_9751><odb. k US_OC_5286	AlFe	70	192	2,22	1,68	8,18
odb. k US_OC_5286><R UNI	AlFe110/22	110	230	2,19	1,66	20,87

1: Úsek odb. k OC_5396><OC_4455	Typ	S	I_k	$I_{k3 \max}$	$I_{k2 \min}$	t_{typ}
		(mm ²)	(m)	(kA)	(kA)	(s)
odb. k OC_5396><odb. k US_OC_4452	AlFe 70/11	70	896	5,21	3,43	1,24
odb. k US_OC_4452><US_OC_5091	AlFe 70/11	70	38	5,18	3,42	1,54
US_OC_5091><OC_4455	AlFe	35	1512	3,91	2,76	0,39

2: Úsek odb. k OS_OC_5400><OC_9920	Typ	S	I_k	$I_{k3 \max}$	$I_{k2 \min}$	t_{typ}
		(mm ²)	(m)	(kA)	(kA)	(s)
db. k OS_OC_5400><odb. k OC_4531	AlFe	50	1590	2,49	1,87	2,28
odb. k OC_4531><OC_9920	AlFe	50	763	2,28	1,73	3,41
	AXEKVCEY	120	927	2,20	1,67	23,44

3: Úsek odb. k US_OC_5350><OC_9747	Typ	S	I_k	$I_{k3 \max}$	$I_{k2 \min}$	t_{typ}
		(mm ²)	(m)	(kA)	(kA)	(s)
odb. k US_OC_5350><odb k US_OC_9776	AlFe110/22	110	32	2,33	1,76	18,85
odb k US_OC_9776><OC_9747	AlFe 70/11	70	37	2,32	1,76	7,67
	AlFe	70	367	2,25	1,70	7,72
	AlFe42/7	42	1012	2,02	1,55	2,96

Tab. 6.6 Vedení VN80

OC_STER>>OC_CERV	Typ	S	I_k	$I_{k3 \max}$	$I_{k2 \min}$	t_{vyp}
		(mm ²)	(m)	(kA)	(kA)	(s)
OC_STER>>odb. k US_OC_5510	AXEKVCEY	240	184	6,54	3,98	11,44
	AlFe	120	225	6,53	3,98	2,86
odb. k US_OC_5510>>odb. k US_OC_5244	AlFe	120	1055	6,34	3,91	2,87
odb. k US_OC_5244>>odb. k US_OC_5044	AlFe	120	3013	5,03	3,35	3,05
odb. k US_OC_5044>>US_OC_5431	AlFe	120	2840	3,85	2,73	4,84
US_OC_5431>>odb. k US_OC_5142	AlFe	120	1508	3,37	2,45	8,26
odb. k US_OC_5142>>odb. k US_OC_5217	AlFe	120	1794	2,92	2,16	10,75
odb. k US_OC_5217>>odb. k US_OC_5030	AlFe	120	2142	2,50	1,88	14,34
odb. k US_OC_5030>>odb. k US_OC_5370	AlFe	120	1050	2,34	1,77	19,50
odb. k US_OC_5370>>OC_CERV	AlFe	120	2547	2,01	1,53	22,38
	AXEKVCEY	240	102	2,00	1,53	121,23

1: odb. k US_OC_5244>>OC_9130	Typ	S	I_k	$I_{k3 \max}$	$I_{k2 \min}$	t_{vyp}
		(mm ²)	(m)	(kA)	(kA)	(s)
odb. k US_OC_5244>>odb. k OC_4462	AlFe	70	1241	5,93	3,75	1,04
odb. k OC_4462>>OC_9130	AlFe42/7	42	1985	4,47	3,07	0,43
2: odb. k US_OC_5217>>OC_4619	Typ	S	I_k	$I_{k3 \max}$	$I_{k2 \min}$	t_{vyp}
		(mm ²)	(m)	(kA)	(kA)	(s)
odb. k US_OC_5217>>odb. k OC_4617	AlFe	50	1592	2,59	1,94	2,49
odb. k OC_4617>>OC_4619	AlFe42/7	42	1903	2,21	1,68	2,24

Tab. 6.7 Vedení VN309

R STE>>OC_4380	Typ	S	I_k	$I_{k3 \max}$	$I_{k2 \min}$	t_{vyp}
		(mm ²)	(m)	(kA)	(kA)	(s)
R STE>>odb. k US_OC_5134	AXEKVCEY	240	136	6,54	3,98	11,44
	AlFe110/22	110	69	6,54	3,98	2,40
odb. k US_OC_5134>>odb. k US_OC_5365	AlFe110/22	110	457	6,50	3,97	2,40
odb. k US_OC_5365>>odb. k US_OC_5212	AlFe110/22	110	1351	6,10	3,82	2,43
odb. k US_OC_5212>>OC_4366	AlFe110/22	110	64	6,07	3,80	2,76
	ANKTOYPV	240	1087	5,92	3,74	11,36
OC_4366>>OC_9926	AXEKVCEY	240	639	5,80	3,69	13,98
OC_9926>>OC_4376	AXEKVCEY	240	15	5,80	3,69	14,52
OC_4376>>OC_9019	AXEKVCEY	240	155	5,77	3,68	14,53
OC_9019>>OC_9858	AXEKVCEY	240	532	5,68	3,64	14,67
OC_9858>>OC_4402	AXEKVCEY	240	485	5,59	3,60	15,18
OC_4402>>OC_4380	AXEKVCEY	240	602	5,47	3,55	15,67

Tab. 6.8 Vedení VN315

OC_STER><OC_4390	Typ	<i>S</i>	<i>I_k</i>	<i>I_{k3} max</i>	<i>I_{k2} min</i>	<i>t_{typ}</i>
		(mm ²)	(m)	(kA)	(kA)	(s)
OC_STER><US_OC_5035	AXEKVCEY	240	140	6,54	3,98	11,44
US_OC_5035><odb. k US_OC_5134	AlFe110/22	110	33	6,54	3,98	2,40
odb. k US_OC_5134><odb. k US_OC_5504	AlFe110/22	110	454	6,50	3,97	2,40
odb. k US_OC_5504><odb. k US_OC_5373	AlFe110/22	110	938	6,27	3,88	2,43
odb. k US_OC_5373><US_OC_5132	AlFe110/22	110	895	5,91	3,74	2,61
US_OC_5132><OC_9860	ANKTOYPV	240	610	5,81	3,70	12,01
OC_9860><OC_9859	ANKTOYPV	240	604	5,72	3,66	12,40
OC_9859><OC_4390	ANKTOYPV	240	788	5,58	3,60	12,83
	AXEKVCEY	240	118	5,56	3,59	15,69
	ANKTOYPV	240	722	5,44	3,54	13,54

Tab. 6.9 Vedení VN321

R STE><US_OC_5189	Typ	<i>S</i>	<i>I_k</i>	<i>I_{k3} max</i>	<i>I_{k2} min</i>	<i>t_{typ}</i>
		(mm ²)	(m)	(kA)	(kA)	(s)
R STE><odb. k US_OC_5184	AXEKVCEY	240	150	6,54	3,98	11,44
	AlFe110/22	110	1382	6,29	3,89	2,40
odb. k US_OC_5184><odb. k OC_4475	AlFe110/22	110	1627	5,57	3,60	2,60
odb. k OC_4475><odb. k US_OC_5152	AlFe110/22	110	2123	4,53	3,10	3,31
odb. k US_OC_5152><odb. k OC_4482	AlFe110/22	110	2607	3,52	2,54	5,01
odb. k OC_4482><US_OC_5189	AlFe	120	716	3,31	2,41	9,86
US_OC_5189><odb. k US_OC_5275	AlFe	120	1801	2,87	2,13	11,13
odb. k US_OC_5275><odb. k US_OC_5288	AlFe	120	947	2,68	2,00	14,81
odb. k US_OC_5288><US_OC_5126	AlFe	120	2119	2,33	1,76	17,01
US_OC_5126><odb. k US_OC_5330 (vn69)	AlFe	120	2071	2,05	1,57	22,62
odb. k US_OC_5330><R MOB	AlFe	120	215	2,03	1,55	29,00
	AXEKVCEY	150	116	1,87	1,43	46,42

Tab. 6.10 Vedení VN337

R STE><OC_9358 (Granitol)	Typ	<i>S</i>	<i>I_k</i>	<i>I_{k3} max</i>	<i>I_{k2} min</i>	<i>t_{typ}</i>
		(mm ²)	(m)	(kA)	(kA)	(s)
R STE><US_OC_5447	AXEKVCEY	240	191	6,54	3,98	11,44
	AlFe110/22	110	18	6,54	3,98	2,40
US_OC_5447><US_OC_5185	AlFe	185	13782	2,30	1,74	6,79
US_OC_5185><OC_9352	AlFe110/22	110	14	2,30	1,74	19,47
	AlFe110/22	110	1066	2,15	1,63	19,51
OC_9352><OC_9358	AXEKVCEY	240	356	2,13	1,62	106,02

Tab. 6.11 Vedení VN956

R STE><OC_4377	Typ	<i>S</i>	<i>I_k</i>	<i>I_{k3 max}</i>	<i>I_{k2 min}</i>	<i>t_{typ}</i>
		(mm ²)	(m)	(kA)	(kA)	(s)
R STE><odb. k US_OC_5448	AXEKVCEY	240	100	6,54	3,98	11,44
	AlFe110/22	110	160	6,54	3,98	2,40
odb. k US_OC_5448><odb. k US_OC_5161	AlFe	120	780	6,37	3,92	2,86
odb. k US_OC_5161><US_OC_5511	AlFe	120	412	6,20	3,85	3,02
US_OC_5511><OC_4817	AXEKVCEY	240	418	6,14	3,83	12,73
OC_4817><OC_9857	AXEKVCEY	240	530	6,06	3,80	12,98
OC_9857><OC_4367	AXEKVCEY	240	725	5,94	3,75	13,33
OC_4367><OC_4372	AXEKVCEY	240	53	5,93	3,75	13,87
	ANKTOYPV	240	319	5,88	3,73	7,72
OC_4372><OC_9855	ANKTOYPV	120	266	5,80	3,69	1,96
OC_9855><OC_4368	ANKTOYPV	120	326	5,70	3,65	2,01
OC_4368><OC_4729	ANKTOYPV	120	240	5,63	3,62	2,09
	AXEKVCEY	240	5	5,63	3,62	15,45
OC_4729><OC_4374	AXEKVCEY	240	5	5,63	3,62	15,45
	ANKTOYPV	120	90	5,60	3,61	2,14
	AXEKVCEY	240	344	5,53	3,58	15,62
OC_4374><OC_4384	AXEKVCEY	240	666	5,41	3,52	15,98
OC_4384><OC_4377	ANKTOYPV	120	378	5,28	3,47	2,32

1: Úsek odb. k US_OC_5161><OC_4377	Typ	<i>S</i>	<i>I_k</i>	<i>I_{k3 max}</i>	<i>I_{k2 min}</i>	<i>t_{typ}</i>
		(mm ²)	(m)	(kA)	(kA)	(s)
odb. k US_OC_5161><OC_4392	AlFe	120	268	6,26	3,88	3,02
	ANKTOYPV	240	381	6,22	3,86	6,91
OC_4392><OC_4400	ANKTOYPV	240	279	6,18	3,85	7,02
OC_4400><OC_9851	ANKTOYPV	240	117	6,17	3,84	7,10
	ANKTOYPV	150	59	6,16	3,84	2,79
OC_9851><OC_4380	ANKTOYPV	120	258	6,09	3,81	1,79
OC_4380><OC_4383	ANKTOYPV	120	311	6,01	3,78	1,83
OC_4383><OC_4382	ANKTOYPV	120	370	5,90	3,73	1,88
OC_4382><OC_9852	ANKTOYPV	120	522	5,74	3,67	1,95
OC_9852><OC_4390	ANKTOYPV	120	110	5,70	3,65	2,06
OC_4390><OC_4760	AXEKVCEY	120	284	5,61	3,61	3,76
OC_4760><OC_4391	AXEKVCEY	120	259	5,53	3,58	3,88
	ANKTOYPV	120	65	5,51	3,57	2,22
	AXEKVCEY	240	65	5,50	3,56	16,11
OC_4391><OC_4373	AXEKVCEY	240	60	5,49	3,56	16,18
	ANKTOYPV	240	358	5,42	3,53	9,01
OC_4373><OC_4399	ANKTOYPV	120	145	5,38	3,51	2,30
OC_4399><OC_9853	ANKTOYPV	120	222	5,30	3,48	2,35
OC_9853><OC_4377	ANKTOYPV	120	387	5,17	3,41	2,41

1-1: Úsek OC_4392><OC_4377	Typ	S	I_k	$I_{k3 \text{ max}}$	$I_{k2 \text{ min}}$	t_{typ}
		(mm ²)	(m)	(kA)	(kA)	(s)
OC_4392><OC_4398	ANKTOYPV	240	241	6,19	3,85	7,02
	AXEKVCEY	240	46	6,18	3,85	12,78
OC_4398><OC_4370	ANKTOYPV	240	253	6,15	3,83	7,10
OC_4370><OC_4369	ANKTOYPV	240	345	6,10	3,81	7,18
OC_4369><OC_4381	ANKTOYPV	240	493	6,03	3,79	7,29
OC_4381><OC_4389	ANKTOYPV	120	405	5,92	3,74	1,87
OC_4389><OC_4387	ANKTOYPV	120	367	5,80	3,69	1,94
OC_4387><OC_4378	ANKTOYPV	240	541	5,71	3,66	8,05
OC_4378><4377	ANKTOYPV	240	268	5,67	3,64	8,31

7. Nastavení navržených ochran

Tab. 7.1 Vstupní údaje pro nastavení nadproudových ochran

Vedení	Vstupní údaje				
	PTP	I_n	$I_{k2 \min}$	$I_{k3 \max}$	t_{vyp}
	(-)	(A)	(kA)	(kA)	(s)
VN10	400/5	284	1,01	6,54	1,67
VN77	200/5	225	1,66	6,54	0,39
VN80	400/5	357	1,53	6,54	0,43
VN309	300/5	318	3,55	6,54	2,40
VN315	300/5	318	3,54	6,54	2,40
VN321	400/5	318	1,43	6,54	2,40
VN337	400/5	318	1,62	6,54	2,40
VN956	300/5	318	3,47	6,54	1,79

Tab. 7.2 Nastavení nadproudových ochran v rozvodnách a spínacích stanicích

Vedení	Rozvodna, spínací stanice	Nadproudový stupeň			Zkratový stupeň			Nastavení
		$I_{>}$	$t_{>}$	$t_{p>}$	$I_{>>}$	$t_{>>}$	$t_{p>>}$	
		(A)	(s)	(s)	(A)	(s)	(s)	
VN10		320	1		960	0		nesměrové
VN77	Uničov	240	1,4	1,1	720	0,5	0,2	nesměrové
VN80	Červenka	360	1,1	-	900	0	-	směrové
VN80	Šternberk	400	1,7	1,4	960	0,3	0	nesměrové
VN309		360	1		1200	0		nesměrové
VN315		360	1		900	0		nesměrové
VN321	Moravský Beroun	360	1,3	1	960	0,3	-	nesměrové
VN337		400	1		1600	0		nesměrové
VN956		360	1		900	0		nesměrové

Tab. 7.3 Nastavení dílčích ochran v rozvodně

Vedení	Zemní směrová ochrana			Proudová nesymetrie		Automatika opětovného zapnutí
	I_0	U_0	t_0	I_s	t_s	t_{oz}
	(A)	(%)	(s)	(%)	(s)	(s)
VN10	2	15	0,2	10	5	0,8
VN77	2	15	0,2	10	5	0,8
VN80	2	15	0,2	10	5	0,8
VN309	2	15	0,2	10	5	0,8
VN315	2	15	0,2	10	5	0,8
VN321	2	15	0,2	10	5	0,8
VN337	2	15	0,2	10	5	0,8
VN956	2	15	0,2	10	5	0,8

8. Zhodnocení navrženého řešení

V diplomové práci je zpracován návrh a vhodné nastavení jednotlivých elektrických ochran rozvodny 22 kV Šternberk.

Úvodní část této diplomové práce stručně charakterizuje řešený problém. V teoretické části práce jsou definovány základní pojmy jako ochrana, chráněný objekt a poruchové stavy, které se mohou při provozu elektrizační soustavy vyskytnout. Dále jsou zde popsány požadavky, které jsou na ochrany kladeny, základní členy ochran, nadproudové ochrany, zemní ochrana a automatika opětovného zapnutí. Tato část se zabývá taktéž teoretickým rozbořem a zásadami pro výpočet zkratových poměrů v elektrizační soustavě. Praktická část diplomové práce obsahuje stručný popis současného stavu chránění rozvodny a nově navržených ochran pro rozvodnu Šternberk. V této části je proveden také výpočet maximálních trojfázových a minimálních dvoufázových zkratových proudů pro jednotlivé vývody z rozvodny 22 kV. Na základě těchto výpočtů jsou nastaveny nově navržené ochrany.

V rozvodně Šternberk bude provedena výměna ochran rozvodny 22 kV. Stávající elektromechanické ochrany jednotlivých vedení jsou již nespolehlivé a budou nahrazeny multifunkčními ochranami SIEMENS SIPROTEC 7SJ636, 7SJ645 a 7SJ804. Stávající záblesková ochrana ER 323 bude ponechána, doplní se logická ochrana. S výměnou ochran se zároveň zruší zastaralý řídicí systém A96.

V základním provozu napájí rozvodna Šternberk jednotlivé vedení VN10, VN77, VN80, VN309, VN315, VN321, VN337, VN956. Spínací stanice Uničov a Moravský Beroun jsou v základním provozu odpojeny. V případě potřeby lze tyto stanice zálohovat z rozvodny Šternberk. Taktéž rozvodna Červenka je při běžném provozu odpojena. Rozvodnu Červenka je možné využít jako zdroj záložního napájení pro rozvodnu Šternberk.

Nadproudové a zkratové stupně nadproudových ochran, zemní směrové ochrany, ochrany proti proudové nesymetrii a automatiky opětovného zapnutí multifunkčních ochran SIEMENS SIPROTEC 7SJ636 budou nastaveny dle výše uvedených tabulek. Rozběhový proud nadproudového stupně pro každý vývod z rozvodny je nastaven na 120 % dovoleného jmenovitého proudu vedení nebo na 120 % jmenovitého převodu přístrojového transformátoru proudu, se zohledněním selektivity vůči dalším prvkům. Pro určení rozběhového proudu zkratového stupně vycházíme z minimálního dvoufázového zkratového proudu jednotlivých odboček vedení. Výpočet maximálního třífázového zkratového proudu jednotlivých odboček vedení je nutný pro určení

nejvyššího možného vypínacího času zkratového stupně, který musí být zohledněn při nastavování vypínacích časů zkratových stupňů. Vypínací časy nadproudových a zkratových stupňů jsou nastaveny s ohledem na selektivitu působení vůči nastaveným ochranám na podružných rozvodnách. Vypínací časy nadproudových ochran jsou nastaveny s časovým odstupňováním od rozvodny Červenka a spínacích stanic Moravský Beroun a Uničov. Jestliže rozvodna Šternberk není spojena vedením se spínací stanicí nebo jinou rozvodnou, není potřeba zohlednit selektivitu vypínání. Vedení VN80 bude chráněno směrem ze Šternberka po vypnutý vypínač v rozvodně Červenka směrovou ochranou a nesměrovou ochranou pro napájení rozvodny Šternberk z rozvodny Červenka. Vedení VN70 směrem na spínací stanici Uničov a vedení VN321 směrem na spínací stanici Moravský Beroun respektuje nastavení ochran vývodů v těchto spínacích stanicích. Proto v tomto případě postačí jedno nesměrové nastavení ochran.

Použitá literatura

- [1] JANÍČEK, F., CHLADNÝ, V. a kol.: *Digitálne ochrany v elektrizačnej sústave*. STU Bratislava, 2004.
- [2] HRADÍLEK, Z.: *Elektroenergetika distribučních a průmyslových sítí*. Montanex a.s., Ostrava, 2008.
- [3] DOHNÁLEK, P.: *Ochrany pro průmysl a energetiku*. SNTL, Praha 1991.
- [4] HALUZÍK, E.: *Ochrany a automatiky v elektrických sítích*. Skriptum VUT Brno, 1991.
- [5] MEDVEC, Z.: *Ochrany a automatiky v elektrických sítích*. VŠB Ostrava, 2011.
- [6] BLOKŠA, M.: *Indikace zemního spojení v sítích vn. Konference ČK CIRED, 2005*.
- [7] ČSN EN 60909-0. *Zkratové proudy v trojfázových střídavých soustavách*. Květen 2002.
- [8] ČSN EN 33 3051. *Ochrany elektrických strojů a rozvodných zařízení*. Listopad 1992.
- [9] Podklady ČEZ Distribuce, a.s.
- [10] SIEMENS: *Technický manuál 7SJ63*.
- [11] SIEMENS: *Technický manuál 7SJ80*.
- [12] ČEPS: *Údaje o PS*. [online]. 2015. [cit. 2015-03-04].
Dostupné z: <http://www.ceps.cz/CZE/Cinnosti/Technicka-infrastruktura/Stranky/Udaje-o-PS.aspx>

Seznam obrázků

<i>Obr. 2.1 Schéma rozvodné soustavy České republiky [12]</i>	2
<i>Obr. 2.2 Spolupráce ochrany a chráněného objektu [4]</i>	3
<i>Obr. 2.3 Vypínací charakteristiky nadproudových ochran [4]</i>	16
<i>Obr. 2.4 Vypínací plán závislých nadproudových ochran [4]</i>	16
<i>Obr. 2.5 Vypínací plán nezávislých nadproudových ochran [4]</i>	17
<i>Obr. 2.6 Zjednodušené schéma vedení se zemní poruchou [6]</i>	19
<i>Obr. 3.1 Sousledná složka zkratové impedance [7]</i>	25
<i>Obr. 3.2 Zpětná složka zkratové impedance [7]</i>	26
<i>Obr. 3.3 Netočivá složka zkratové impedance [7]</i>	26
<i>Obr. 4.1 Schéma rozvodny Šternberk 110/22 kV [9]</i>	31

Seznam tabulek

<i>Tab. 4.1 Stávající ochrany rozvodny</i>	34
<i>Tab. 4.2 Stávající ochrany rozvodny</i>	34
<i>Tab. 6.1 Zkratové hodnoty rozvodny Šternberk</i>	38
<i>Tab. 6.2 Parametry transformátorů</i>	38
<i>Tab. 6.3 Parametry vedení</i>	43
<i>Tab. 6.4 Vedení VN10</i>	44
<i>Tab. 6.5 Vedení VN77</i>	45
<i>Tab. 6.6 Vedení VN80</i>	46
<i>Tab. 6.7 Vedení VN309</i>	46
<i>Tab. 6.8 Vedení VN315</i>	47
<i>Tab. 6.9 Vedení VN321</i>	47
<i>Tab. 6.10 Vedení VN337</i>	47
<i>Tab. 6.11 Vedení VN956</i>	48
<i>Tab. 7.1 Vstupní údaje pro nastavení nadproudových ochran</i>	50
<i>Tab. 7.2 Nastavení nadproudových ochran v rozvodnách a spínacích stanicích</i>	50
<i>Tab. 7.3 Nastavení dílčích ochran v rozvodně</i>	51